




MINISTERO DELLE FINANZE



Rivista del
dipartimento
del territorio

3

1999

ANNO VII

Quadrimestrale di informazione tecnica

Spedizione in abbonamento postale 70% - Filiale di Roma

ISSN 1122-4463

Valutazione delle caratteristiche metrologiche di strumentazione ottica per il monitoraggio strutturale: il caso del collimatore automatico ISAC 5000

ALESSANDRO AZZONI (*), MARCO SCAIONI (**), GIORGIO VASSENA (***)

RIASSUNTO

L'articolo presenta la metodologia utilizzata per la validazione delle caratteristiche metrologiche del collimatore ISAC 5000, utilizzato per il monitoraggio di dighe. La ricerca è stata condotta dal D.I.I.A.R. del Politecnico di Milano in collaborazione con ISMES Spa, progettista e produttore dello strumentazione. L'analisi ha riguardato innanzitutto l'elaborazione delle misure provenienti dalle prime installazioni sperimentali del collimatore. Successivamente sono state condotte 5 campagne di misura presso la diga di Gusana in Sardegna, dove è presente un'installazione di ISAC 5000, durante le quali sono stati acquisiti i dati necessari per la validazione delle caratteristiche metrologiche e per studiare l'influenza dei parametri ambientali sulle misure.

1. - INTRODUZIONE

Il monitoraggio degli spostamenti delle dighe è stato realizzato fino ad oggi mediante le classiche metodologie di rilevamento topografico (reti di livellazione geometrica e poligonali) e mediante i collimatori ottici. Questi metodi, pur garantendo precisioni sufficienti, richiedono tuttavia l'intervento di personale esperto e possono venire effettuate con scarsa frequenza temporale. Il problema dell'automazione costituisce perciò uno degli aspetti di sviluppo più importanti in questo settore, a tal punto che già da alcuni anni sono state condotte prove su strumentazione di tipo sperimentale (Cuniatti e Giussani, 1980). Ben diversa si presenta la situazione per quanto riguarda la sensoristica, che costituisce l'altro grande settore dei controlli strutturali, dove l'automazione è in avanzato stato di sviluppo. Quanto osservato a proposito del monitoraggio delle dighe è ovviamente estendibile alle grandi strutture in genere.

Negli ultimi anni nel panorama degli strumenti topografici sono comparsi nuovi prodotti che permettono di velocizzare e semplificare le procedure di rilevamento, alcuni fino all'acquisizione automatica delle misure. Esempi di questo sono i livelli digitali e le stazioni totali dotate di sistemi di puntamento del prisma, che consentono di ridurre i tempi di misura e rendere la qualità dei risultati

(*) ISMES S.p.A. - Seriate (Bergamo).

(**) Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano.

(***) Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Brescia.

del controllo indipendente dall'operatore. La motorizzazione dei teodoliti permette infatti di monitorare in modo continuo i punti di controllo posti sulla struttura senza l'ausilio di un operatore, che è chiamato ad intervenire solo per le operazioni di installazione e manutenzione. Ad oggi sono state effettuate diverse sperimentazioni di questi strumenti per il controllo di dighe e sono già state realizzate applicazioni operazionali (Whitaker et. al., 1998). Un discorso a parte merita il GPS, il cui impiego è ancor oggi limitato ai controlli nei quali non si richiede una precisione sub-centimetrica. Nel settore del monitoraggio di dighe, ad esempio, questa metodologia è applicabile nel caso di sbarramenti in terra, dove gli spostamenti sono di entità notevole, oppure nel caso di reti di controllo relative all'area di influenza del bacino artificiale (Harris, 1998).

Allo scopo di soddisfare le esigenze di affidabilità e precisione necessarie al controllo dei movimenti orizzontali delle dighe, l'ISMES Spa su incarico di ENEL-CRIS ha sviluppato un sistema automatico di controllo per collimazione denominato ISAC 5000 (Intelligent System for Automatic Collimation). La strumentazione è un'evoluzione moderna del collimatore classico (Marazio, 1962), che costituisce la più tradizionale e diffusa metodologia per il controllo degli spostamenti delle dighe in calcestruzzo, nonché quella richiesta dalle normative vigenti. Lo strumento tradizionale si compone di tre elementi essenziali: un collimatore ottico installato su un pilastro stabile in muratura (Fig. 3), una mira "di misura" che viene posta sul punto della struttura da monitorare (Fig. 10) e una mira di riferimento posizionata generalmente sulla sponda opposta. I tre componenti sono disposti lungo un allineamento rispetto al quale vengono determinati gli spostamenti della mira "di misura". La collimazione tradizionale eseguita su una diga riguarda di solito più punti di controllo i cui movimenti vengono misurati con una frequenza prefissata. Il sistema automatico ISAC 5000 è basato su un principio analogo, dove il collimatore classico è stato sostituito con uno strumento optoelettronico che è in grado di determinare gli spostamenti di una mira luminosa posta sulla struttura mediante algoritmi di analisi delle immagini acquisite. Un singolo impianto può essere costituito da un numero massimo di 6 mire da monitorare, una delle quali deve essere sempre posizionata all'esterno della struttura e serve come punto fisso di riferimento. Al par. 2 verrà illustrato in maggiore dettaglio il funzionamento della strumentazione e saranno evidenziate le sue principali caratteristiche tecniche.

Si vuole chiarire da subito quale sono state le motivazioni che hanno portato alla realizzazione di un siffatto strumento, tenendo anche conto dell'attuale stato dell'arte delle altre metodologie di misura precedentemente illustrate (stazioni totali motorizzate e GPS). Innanzitutto ISAC 5000 permette il monitoraggio degli spostamenti di grandi strutture con una incertezza delle misure (0,8 mm alla distanza di 100 m) non raggiungibile con altra strumentazione. Questo è permesso dall'elevata lunghezza focale del collimatore (5000 mm) che i teodoliti non possono ovviamente adottare e che per questi strumenti rappresenta un limite costruttivo che anche nel futuro non potrà essere superato. Nel controllo di dighe, dove gli spostamenti annuali possono essere anche molto contenuti, si richiede infatti una incertezza di misura non superiore al millimetro che può aumentare, ovviamente, in rapporto alle dimensioni della struttura stessa.

Un secondo fattore che è stato ritenuto fondamentale nella progettazione di ISAC 5000 è il suo utilizzo per la sorveglianza delle dighe ai fini della sicurezza. Questo ha portato ad avere uno strumento semplificato in termini di organi in movimento e di processi funzionali a vantaggio di una maggiore affidabilità e stabilità delle misure, che permettono uno studio accurato del comportamento strutturale nel tempo e quindi dello stato di degrado dell'opera.

Lo strumento è stato sviluppato per il controllo delle dighe ma il suo impiego è estendibile alle grandi strutture in genere. Per le strutture verticali (torri, ciminiere, dighe stesse, pile di viadotti) ISMES ha prodotto un piombo optoelettronico basato su un analogo principio di funzionamento (Matinelli e Pucci delle Stelle, 1996).

Questo articolo presenta le operazioni sperimentali di validazione delle caratteristiche metrologiche del sistema ISAC 5000, eseguita da ISMES in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano. Lo strumento, prima di diventare operativo, è stato sottoposto a lunghi test dal costruttore sia utilizzando un impianto pilota rea-

lizzato presso la sede ISMES di Seriate (Bergamo), sia mediante le installazioni su alcune dighe con differenti situazioni climatiche e ambientali (Anesa et al., 1995). Nel 1996 ISMES ha incaricato il Politecnico di Milano di effettuare la definitiva validazione del sistema, di cui tratterà l'articolo attraverso l'illustrazione delle metodologie utilizzate e dei risultati ottenuti.

2. - DESCRIZIONE DEL SISTEMA ISAC 5000 E DEL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il sistema automatico di collimazione ISAC 5000 è stato sviluppato per monitorare in modo preciso ed affidabile gli spostamenti planimetrici di dighe e più in generale di grandi strutture. La Fig. 1 mostra in modo schematico un'installazione tipo di ISAC 5000 nella quale si possono osservare i principali componenti del sistema:

- le mire luminose (una per ogni punto della struttura che si vuole monitorare, ed una di riferimento);
- i collimatori optoelettronici (uno per ogni mira);
- l'unità elettronica di controllo.

I collimatori e l'unità elettronica di controllo sono predisposti all'interno di un locale (Fig. 3) in cui l'ambiente viene termostato per limitare le escursioni termiche, in particolare sotto 0° C.

I collimatori, costituiti essenzialmente dal teleobiettivo, sono rigidamente fissati mediante basi annegate in un pilastro in calcestruzzo armato che appoggia direttamente sulla roccia stabile. Ciascuno di essi è puntato in modo stabile verso una mira luminosa, della quale misura gli spostamenti planimetrici lungo la componente ortogonale all'asse di collimazione. La soluzione di un sistema costituito da più collimatori, ciascuno dedicato ad una singola mira e senza meccanismi di movimentazione, è stata adottata per aumentare il grado di precisione e stabilità a lungo termine delle misure, requisiti essenziali per uno strumento automatico di collimazione. Sul piano focale del cannocchiale è posizionata una matrice lineare di sensori CCD (*Charge Coupled Device*) che acquisisce il segnale corrispondente alla mira luminosa e, dopo un opportuno adeguamento, lo trasmette in forma digitale all'unità elettronica collegata ai collimatori. Tale unità provvede al processamento dei dati e fornisce su un display e su porte di comunicazione le misure degli spostamenti delle mire.

Il sistema ISAC 5000 può monitorare contemporaneamente fino a 6 mire luminose, delle quali una (la cosiddetta mira fissa) deve essere posizionata in un'area esterna alla struttura della diga e viene utilizzata come misura di riferimento per compensare sia le eventuali rotazioni del basamento dei collimatori, sia gli effetti causati dalle variazioni dell'indice di rifrazione atmosferica che avvengono durante la giornata. Per questo motivo vengono forniti due tipi di misure: quelle assolute, ottenute direttamente da ogni singolo collimatore e quelle relative, che sono compensate mediante le misure della mira di riferimento.

In Fig. 2 è riportata un'immagine dell'installazione di ISAC 5000 presso la diga di Ambiesta, mentre in Tab. 1 sono riassunte le principali caratteristiche tecniche del collimatore. Nei paragrafi seguenti vengono illustrati nel dettaglio i singoli componenti della strumentazione e il processo di acquisizione ed elaborazione delle misure.

CAMPO DI MISURA	400 mm a 100 m
RISOLUZIONE DI MISURA	0,2 mm a 100 m
PRECISIONE DI MISURA	0,2 % f.s. (0,8 mm a 100 m)
RIPETIBILITÀ	0,1 % f.s. (0,4 mm a 100 m)
TEMPI DI INTEGRAZIONE DELLE MISURE	da 5" a 60"
FOCALE DEL CANNOCCHIALE COLLIMATORE	5000 mm
TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO	da -30 C a +70 C per le mire da -5 C a +50 C per ISAC 5000

Tabella 1 - Le caratteristiche tecniche nominali di ISAC 5000.

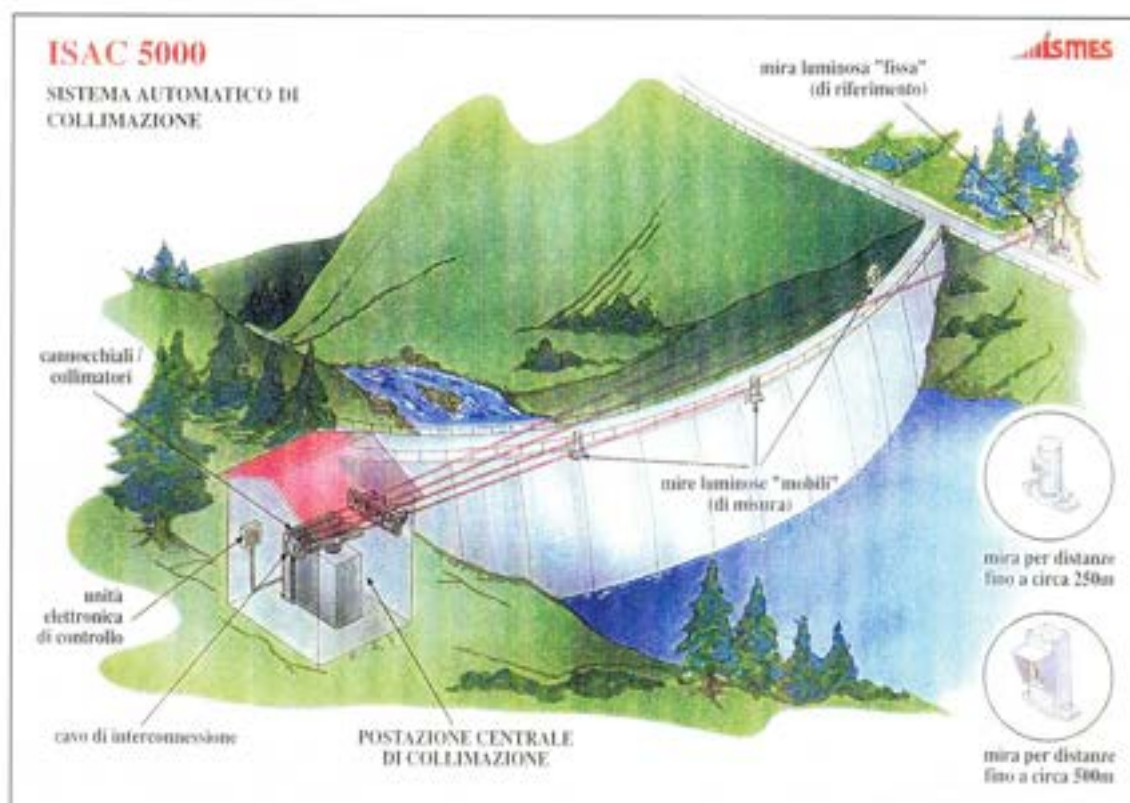


Fig. 1 - Schema illustrativo di un'installazione tipo di ISAC 5000.



Fig. 2 - L'installazione di ISAC 5000 presso la diga di Ambiana.



Fig. 3 - Il locale dei collimatori presso la diga di Comelico; sulla sinistra si può osservare l'unità elettronica di controllo, mentre sulla destra è presente un collimatore ottico Galileo.

2.1. - LE MIRE LUMINOSE

I punti della struttura che devono essere monitorati sono materializzati mediante mire luminose, che vengono scelte tra due modelli disponibili in base alla distanza tra collimatore e mira. La differenza tra questi è costituita dalle diverse dimensioni delle fenditure e dell'interasse fra queste, nonché dal numero di lampade poste all'interno (Fig. 4).

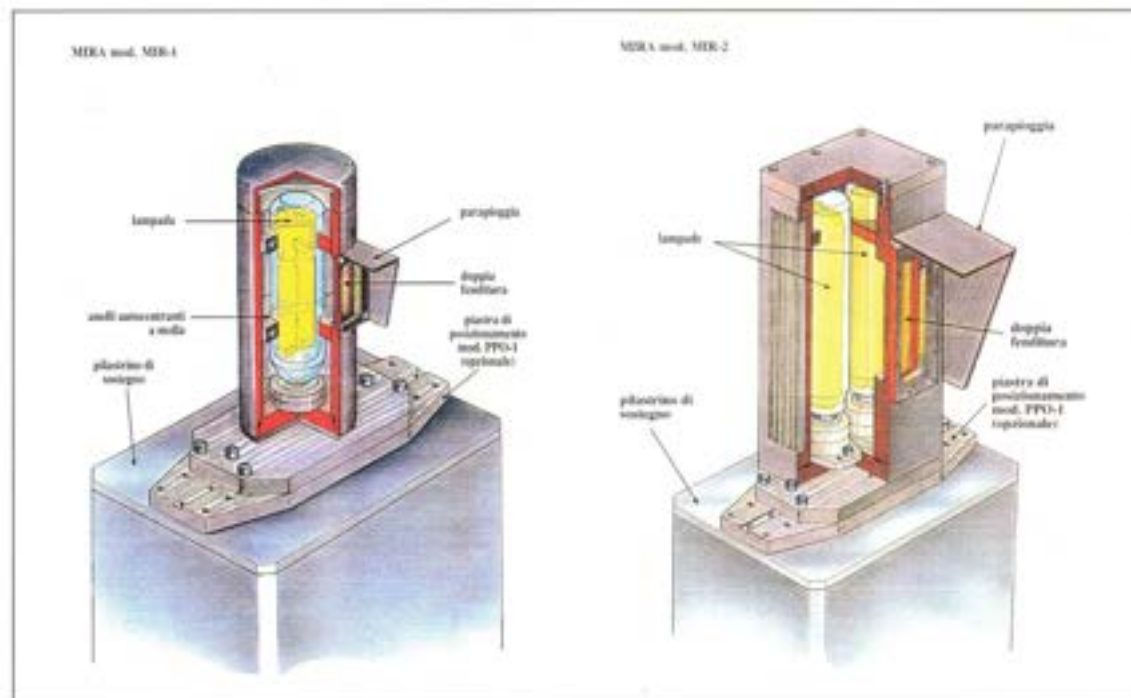


Fig. 4 - I due modelli di mire luminose utilizzati rispettivamente per distanze inferiori a 250 m (a sinistra) e per distanze nell'intervallo 150,500 m (a destra).

Le mire sono in acciaio inossidabile con fori filettati alla base per il fissaggio su pilastrino o su mensola. Nella parte anteriore della mira è ricavata una doppia apertura a tenuta stagna, protetta da vetro semi-ottico, attraverso la quale la luce emessa da una lampada forma l'immagine che viene acquisita dal collimatore. La larghezza ottimale delle fenditure viene definita all'atto dell'installazione, scegliendo tra una gamma di lamine fornite con le mire. Le lampade a vapori di sodio a bassa pressione e luce monocromatica consentono il funzionamento dello strumento con le sue prestazioni nominali anche in condizioni di visibilità difficili, quali la presenza di forti neviccate, nebbia o pioggia battente.

2.2. - IL CANNOCCHIALE COLLIMATORE

L'elemento principale del sistema è il cannocchiale collimatore, raffigurato in modo schematico in Fig. 5. La struttura del cannocchiale, in acciaio brunito trattato chimicamente onde evitare fenomeni di ossidazione nel corso degli anni, è saldata nella parte centrale ad una base di supporto realizzata con accorgimenti tali da consentire la rotazione sul piano orizzontale e l'inclinazione sul piano verticale. Questi "gradi di libertà" agevolano le operazioni di puntamento del collimatore verso la corrispondente mira durante l'installazione. La base di supporto del cannocchiale viene bloccata nella posizione definitiva serrando le apposite viti, che agiscono in modo da limitare le tensioni meccaniche e assicurare la stabilità dello strumento; in tal modo questo rimane solidale ad un supporto cilindrico, precedentemente vincolato ad un basamento di calcestruzzo armato. L'ottica è costituita da un obiettivo, un diaframma e una lente di messa a fuoco che realizzano un teleobiettivo da 5000 mm di focale e 80 mm di apertura. Sul piano immagine del collimatore è posizionato un fotosensore costituito da una matrice lineare di 1728 fotodiodi (pixels) di tipo CCD, ciascuno avente larghezza di 13 mm.

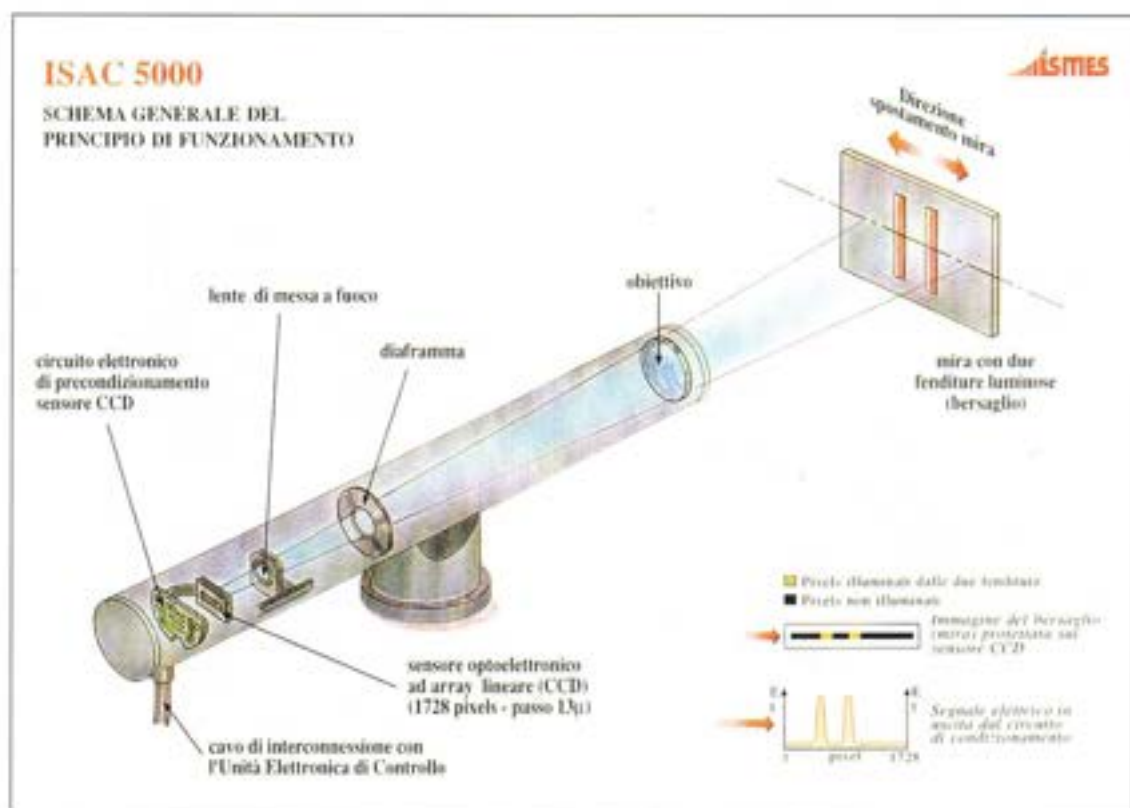


Fig. 5 - Schematizzazione del principio di funzionamento del collimatore.

Al fotosensore è collegato un circuito elettronico di preconditionamento del segnale di misura che comunica con l'unità elettronica di controllo tramite un cavo d'interconnessione.

Le componenti meccaniche e ottiche del collimatore sono state progettate in modo da risentire il meno possibile degli effetti deformativi riconducibili alle variazioni termiche, che potrebbero introdurre incertezze indesiderate nel segnale di misura. Tuttavia è necessario scongiurare la presenza di fonti di calore anomale che riscaldino in modo non uniforme il cannocchiale e il relativo basamento di supporto. Per questo motivo il locale che ospita la strumentazione è dotato di una scaldiglia termostata per ridurre le escursioni di temperatura.

2.3. – L'UNITÀ ELETTRONICA DI CONTROLLO

L'unità elettronica di controllo provvede all'acquisizione del segnale proveniente dai collimatori, alla elaborazione e validazione delle misure, nonché alla loro visualizzazione o trasmissione all'esterno del sistema attraverso diversi tipi di interfacce (Fig. 6). L'interfaccia operatore utilizza il display digitale e la tastiera, di cui è dotata frontalmente l'unità elettronica, per fornire sinteticamente tutte le principali informazioni utili nella fase di installazione, nella fase operativa e durante gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria del sistema. In caso di anomalia del sistema, l'interfaccia fornisce dati diagnostici che facilitano l'individuazione del mal funzionamento. L'interfaccia locale di servizio permette il collegamento ad un PC munito di apposito programma per permettere l'esecuzione di analisi diagnostiche e per l'impostazione di parametri. Tale metodologia è utilizzata durante le operazioni di collaudo, di avviamento e di manutenzione dell'impianto e per una eventuale registrazione in continuo dei dati. L'interfaccia di telecomunicazione permette la trasmissione di informazioni secondo standard di comunicazione digitale a sistemi centralizzati di supervisione e monitoraggio, mentre l'interfaccia analogica consente il collegamento a sistemi remoti di acquisizione dati, fornendo le misure degli spostamenti delle mire in formato analogico.

2.4. – GLI ALGORITMI PER L'ELABORAZIONE DELLE MISURE

L'unità elettronica di controllo elabora il segnale proveniente da ciascun collimatore e fornisce le misure di tipo assoluto; tramite una combinazione lineare di queste con le misure contemporanee della mira fissa si ricavano poi le misure relative. L'osservazione elementare che viene utilizzata per ricavare la misura di spostamento è costituita dall'immagine di una sezione orizzontale (*frame*) della

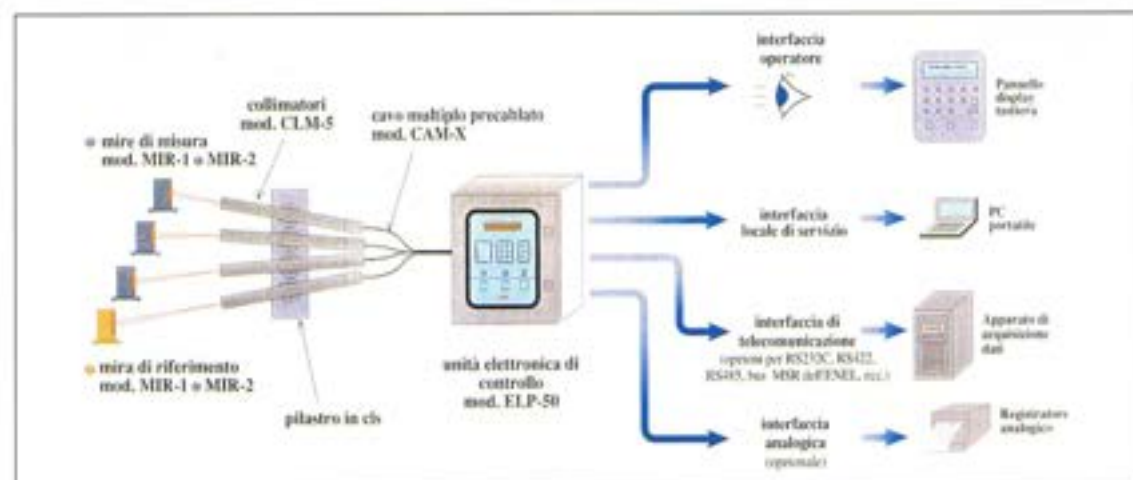


Fig. 6 – Schema delle connessioni tra l'unità elettronica di controllo e le diverse componenti del sistema ISAC 5000.

mira luminosa che si forma sulla matrice di sensori CCD. I singoli fotodiodi rimangono impressionati dall'emissione luminosa della mira e assumono un valore di carica elettrica maggiore in corrispondenza delle due fenditure (si veda il grafico in Fig. 7); l'intensità luminosa di ciascun pixel viene registrata a 8 bit. Ogni singola immagine impiega un tempo medio di circa 100 ms per formarsi, in condizioni standard della quantità di luce. La misura assoluta viene elaborata basandosi sulla media di più *frame*, in modo da evitare l'influenza di fenomeni temporanei di disturbo causati ad esempio da ostacoli accidentali che interrompono il percorso del raggio di collimazione. L'andamento tipico dei profili delle immagini è contraddistinto dalla presenza di due picchi corrispondenti alle fenditure luminose delle mire.

La misura viene elaborata mediante la determinazione dell'ascissa dei baricentri X_1 e X_2 di ogni singolo picco dalla cui media aritmetica si ricava il baricentro M dell'immagine. Il calcolo viene realizzato tramite un algoritmo definito a *doppia soglia*, che utilizza l'intersezione tra due rette orizzontali e i fronti di salita e di discesa dei due picchi dell'immagine per determinare l'ascissa del centro di ciascun picco. Supponendo che i *frame* analizzati siano N (generalmente 64), si ottengono altrettanti valori di X_{1i} e X_{2i} , a partire dai quali si determinano i valori medi (μ_{X1} e μ_{X2}) ed i relativi sqm (σ_{X1} e σ_{X2}). Per ogni *i-esimo frame* devono risultare verificate le due relazioni seguenti:

$$(1) \quad (X_{1i} - \mu_{X1}) < k \sigma_{X1} \quad \text{e} \quad (X_{2i} - \mu_{X2}) < k \sigma_{X2} \quad i=1, 2, \dots, N$$

dove con k si indica una costante prefissata ricavata da considerazioni statistiche. Se la verifica è negativa, il *frame* viene scartato dai dati e si determinano nuovi valori delle medie e degli sqm. Se il numero di *frame* eliminati dovesse superare una percentuale prefissata di quelli acquisiti, l'acquisizione viene ripetuta e l'algoritmo applicato nuovamente. La scelta dei due valori di soglia relativi alle due rette orizzontali deve essere prefissata a priori in modo accurato e generalmente dipende dalle caratteristiche ambientali del sito di installazione. Il sistema è comunque in grado di autoregolare i valori di soglia impostati per inseguire le variazioni dell'intensità luminosa.

Attraverso le medie μ_{X1} e μ_{X2} è possibile determinare lo spostamento assoluto m_A :

$$(2) \quad m_A = \frac{\mu_{X1} + \mu_{X2}}{2} \cdot \frac{d}{f}$$

dove d è la distanza fra il collimatore e la rispettiva mira e f la lunghezza focale del cannocchiale. La misura relativa m_R viene ricavata mediante una combinazione lineare della misura assoluta m_A e della misura contemporanea alla mira fissa m_0 :

$$(3) \quad m_R = m_A - m_0 \cdot \frac{d}{d_0}$$

dove d_0 è la distanza tra la mira fissa e la postazione dei collimatori.

Un'importante peculiarità del sistema ISAC 5000 è quella di fornire una validazione delle misure che viene effettuata in due modalità diverse. La prima è quella che utilizza le cosiddette misure di *test*. La presenza di due fenditure luminose rende possibile avere un controllo sulle osservazioni effettuate mediante una valutazione dell'interasse tra queste, che dovrà mantenersi nel tempo sempre pari a un valore predefinito. La misura di *test T* corrispondente alla distanza fra i centri delle due fenditure luminose della mira è data dalla relazione:

$$(4) \quad T = (\mu_{X2} - \mu_{X1}) \cdot \frac{d}{f}$$

Il secondo aspetto della validazione delle misure riguarda l'autoanalisi interna del sistema che evidenzia eventuali problemi. A ciascuna misura viene associato un livello di accettabilità corrispondente ad una delle tre seguenti categorie:

1. la misura è affidabile;
2. la misura non è completamente affidabile;
3. il sistema è in una situazione di anomalia permanente che richiede l'intervento di personale in grado di ripristinarne il corretto funzionamento.

Nell'ipotesi di funzionamento al secondo livello, lo strumento, alla richiesta del dato di misura da parte del sistema di acquisizione, restituisce il valore dell'ultima misura ritenuta valida. Il ripristino al primo livello di accettabilità avviene automaticamente con il ritorno alle condizioni operative ordinarie. Il perdurare delle condizioni di segnalazione di secondo livello oltre un intervallo di tempo prefissato genera il passaggio automatico alla segnalazione di terzo livello.

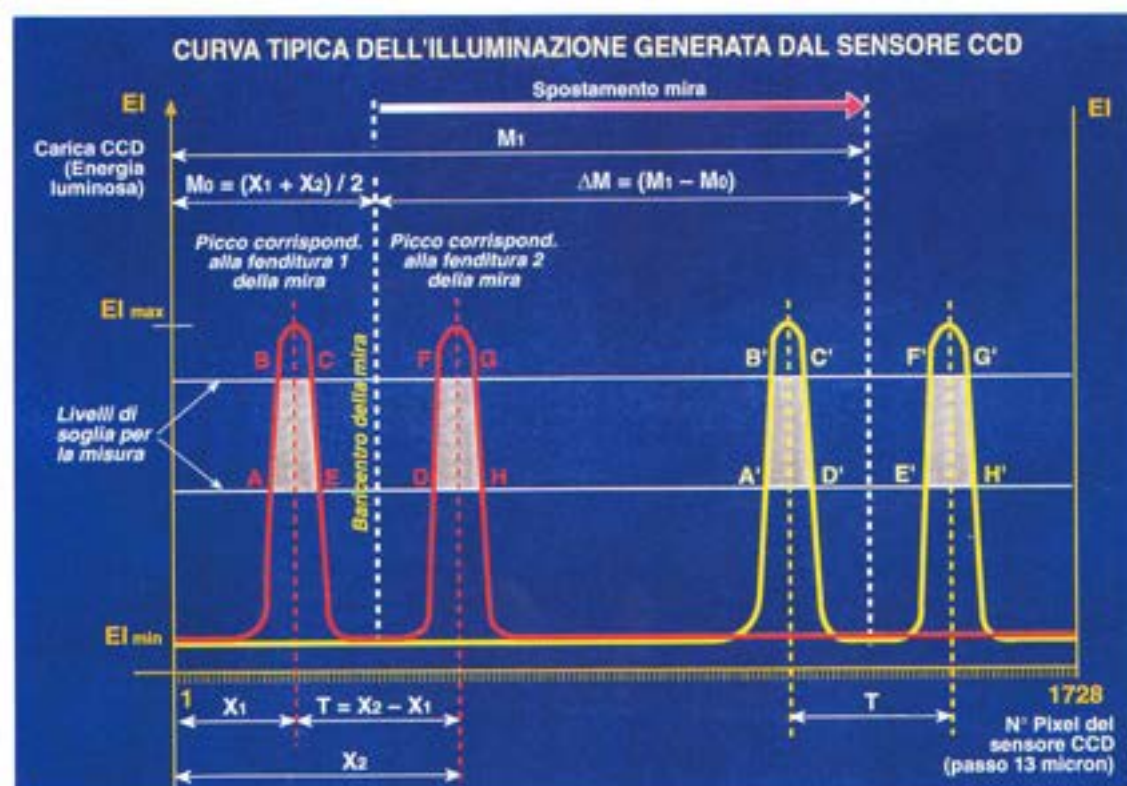


Fig. 7 - Rappresentazione del segnale fornito dai singoli collimatori; le curve in rosso e in giallo corrispondono a due diverse posizioni delle mire luminose.

3. - ANALISI DEI DATI RELATIVI ALLE PRIME INSTALLAZIONI SPERIMENTALI

Lo studio del comportamento metrologico del collimatore ISAC 5000 ha avuto inizio con l'analisi dei dati acquisiti dagli impianti sperimentali installati presso le dighe di Ambiesta e di Comelico, delle quali si riportano in Tab. 2 le caratteristiche principali. Queste misure, riguardanti un periodo a cavallo degli anni 1994/95, hanno permesso di effettuare una prima analisi dello strumento, sulla base della quale sono poi state pianificate le campagne sperimentali di misura e le elaborazioni successive.

Dei collimatori ISAC 5000 installati presso le due dighe sopra menzionate sono state fornite le misure degli spostamenti di alcuni punti da monitorare, unitamente alle misure degli spostamenti degli stessi punti ottenuti con altri sistemi di collimazione manuale ed automatica.

Da tempo alla diga di Ambiesta è installato un collimatore automatico DELTA 2000 (Giussani e Cuniatti, 1984), dove operano anche due collimatori ISAC 5000. Il confronto tra i due sistemi permette di verificare il comportamento nel lungo periodo del nuovo collimatore rispetto ad un sistema per il controllo delle dighe già studiato da anni, seppure in via sperimentale. La mira mobile di ISAC 5000 e quella di DELTA 2000 sono posizionate nello stesso punto sul coronamento della diga e quindi le misure possono essere confrontate. Le elaborazioni sono state eseguite relativamente a due periodi campione, opportunamente depurati dagli errori grossolani; la frequenza delle misure è di 1 dato per ora. L'analisi delle differenze tra le misure contemporanee dei due strumenti ha evidenziato dei valori degli s_{qm} pari a 0,54 e 0,33 mm nei due periodi esaminati. Si ritiene che questi valori siano imputabili al fatto che i due strumenti sfruttano diversi principi fisici (differenze di tempo per il DELTA 2000 e distanze sulla matrice lineare di CCD per ISAC 5000) per acquisire i dati e quindi possono essere stati influenzati in modo non uguale. Si può perciò dedurre che il collimatore ISAC 5000 si attesta su livelli di precisione analoghi, se non superiori, rispetto all'altra strumentazione.

In entrambi gli impianti sperimentali sono installati dei collimatori ottici Galileo (non automatici; Fig. 3) e si è quindi ritenuto di confrontare le misure ottenute mediante questo tipo di strumentazione a lettura diretta con quelle di ISAC 5000. L'analisi delle misure acquisite dai due strumenti ha evidenziato un comportamento coerente. Tuttavia, dall'osservazione dei dati si nota come le misure eseguite tramite il collimatore Galileo siano molto disperse e questo è concorde con quanto è lecito aspettarsi in via teorica da uno strumento di questi tipi, dove la dipendenza dall'abilità dell'operatore è notevole e i fattori ambientali influenzano sensibilmente le misure.

	AMBIESTA	COMELICO	GUSANA
TIPOLOGIA DI SBARRAMENTO	ad arco, a doppia curvatura	a volta sottile	ad arco, a doppia curvatura
CAPACITÀ UTILE DEL BACINO	3.600.000 m ³	1.800.000 m ³	64.000.000 m ³
N° DI COLLIMATORI ISAC 5000	2	4	4
DURATA DEL PERIODO DI ACQUISIZIONE DELLE MISURE	14 mesi	19 mesi	—
FREQUENZA DELLE MISURE	1 ogni ora	1 ogni 2 ore	—
ALTRI SISTEMI DI COLLIMAZIONE PRESENTI PRESSO LA DIGA	collimatore ottico Galileo collimatore automatico DELTA 2000	collimatore ottico Galileo	collimatore ottico Galileo
DISTANZE MIRA-COLLIMATORE (PER ISAC 5000)	153 m (mira fissa), 81 m	103 m (mira fissa), 78 m, 59 m, 36 m	403 m (mira fissa), 288 m, 237 m, 194 m

Tabella 2 - Caratteristiche principali delle dighe di Ambiesta, di Comelico e di Gusana.

4. - LE CAMPAGNE DI MISURA

La verifica sperimentale delle caratteristiche metrologiche del collimatore ISAC 5000 è stata condotta sulla base di 5 campagne di misura, che si sono svolte presso l'impianto installato a controllo della diga del lago di Gusana in provincia di Nuoro; si tratta di uno sbarramento ad arco-cupola asimmetrica sul fiume Taloro, nell'ambito del bacino idrografico del Tirso. In Fig. 8 è riportata una fotografia della diga mentre in Tab. 2 ne sono riassunte le caratteristiche principali. La scelta di questo impianto è stata motivata dalle grandi distanze fra i collimatori e le mire, fatto che ha permesso di sperimentare il comportamento della strumentazione sull'intero campo di funzionamento. Inoltre, poiché le opere di presa della diga convogliano le portate ad una centrale idroelettrica ENEL che opera anche come stazione di pompaggio nelle ore notturne, nel corso delle campagne di misura la quota d'invaso si è mantenuta pressoché costante e quindi gli spostamenti orizzontali

della struttura sono risultati molto contenuti. Questo fatto è risultato molto importante per le prove sperimentali illustrate nel seguito. Le 5 campagne di misura sono state distribuite lungo il corso di un anno, in modo da coprire le differenti stagioni.



Fig. 8 - La diga del lago di Gusana in Sardegna.

4.1. - L'INSTALLAZIONE DI ISAC 5000 PRESSO LA DIGA DI GUSANA

L'installazione di ISAC 5000 è realizzata secondo la seguente tipologia d'impianto: 4 collimatori posizionati sulla sponda sinistra della diga, dei quali uno è puntato sulla mira fissa, posizionata sulla sponda destra del bacino (mira 0) e gli altri sono puntati su 3 mire poste sul coronamento della diga (mire 1, 2, 3). Le caratteristiche geometriche dell'impianto di collimazione sono desumibili dalla planimetria riportata in Fig. 9. Nell'impianto è presente anche una serie di punti di controllo per le misure di collimazione di tipo tradizionale che vengono effettuate periodicamente dai tecnici ENEL.

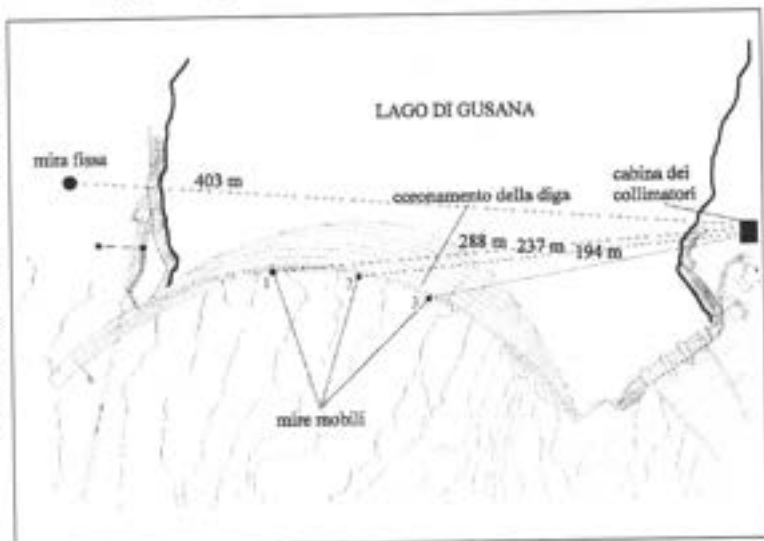


Fig. 9 - Planimetria della diga di Gusana.



Fig. 10 – Una mira luminosa di ISAC 5000 montata sulla slitta micrometrica utilizzata durante le prove sperimentali; sulla sommità del pilastro si può vedere la mira utilizzata per le misure mediante il collimatore ottico.

Le mire dei due sistemi sono posizionate nei medesimi punti del coronamento e quindi è possibile un confronto fra gli spostamenti misurati mediante le diverse strumentazioni (Fig. 10).

4.3. – LE PROVE SPERIMENTALI ESEGUITE DURANTE LE CAMPAGNE DI MISURA

Le indagini sperimentali condotte durante le campagne a Gusana sono state sostanzialmente costituite dalla misura mediante il sistema ISAC 5000 di spostamenti noti imposti alle mire mediante una slitta micrometrica. Le prove sono state eseguite sulle mire 1 e 3, rispettivamente la più lontana (288 m) e la più vicina (194 m) dai collimatori e sulla mira fissa 0. Ciascuna campagna è stata pianificata in modo che ogni giorno le prove interessassero una singola mira, suddivise in due sessioni della durata media di circa 3 ore, una al mattino e l'altra al pomeriggio. La slitta micrometrica (Fig. 10) è stata montata direttamente sulla mensola di fissaggio della mira luminosa, che a sua volta è stata posizionata sulla parte mobile della slitta stessa in modo da essere movimentata di quantità note. Gli spostamenti della slitta sono stati misurati mediante una riga ottica elettronica dotata di una precisione di circa 0,01 mm.

Le sessioni di misura sono state impostate sull'esecuzione di tre cicli di spostamenti consecutivi senza interruzioni secondo il seguente schema:

1. ciclo di spostamenti con passi di 0,2 mm:

0,0	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0	+0,8	+0,6	+0,4	+0,2	0,0
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----

queste misure sono state utilizzate per il calcolo della risoluzione strumentale;

2. ciclo di spostamenti con passi di 2,0 mm:

0,0	+2,0	+4,0	+6,0	+8,0	+10,0	+8,0	+6,0	+4,0	+2,0	0,0
-----	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-----

gli spostamenti imposti durante questo ciclo hanno permesso di valutare il comportamento del collimatore nell'apprezzare gli spostamenti millimetrici, che sono quelli più significativi nel monitoraggio di una diga come quella di Gusana;

3. ciclo di spostamenti con passi da 10,0 a 140,0 mm:

0,0	-60,0	-30,0	0,0	+30,0	+60,0	+30,0	+0,0	-30,0	-60,0	-70,0	+70,0	0,0
-----	-------	-------	-----	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	-----

la finalità di quest'ultima serie di spostamenti è stata duplice: verificare la capacità di ISAC 5000 di misurare rapidamente spostamenti di grande entità e valutare il comportamento dello strumento quando nella misura vengono interessate anche le zone laterali dell'array di CCD e dell'ottica.

I singoli passi di spostamento della slitta micrometrica sono stati eseguiti nel modo più rapido possibile, da pochi secondi per i movimenti di 0,2 mm e di 2,0 mm fino a circa 30" per quelli di 140,0 mm. La mira è stata lasciata ferma su ciascuna posizione per un tempo di 5-6 minuti, dei quali circa 3' servono per l'aggiornamento completo del *buffer* contenente le misure da mediare; questo tempo dipende dalla configurazione del sistema ed è stato rallentato rispetto al normale funzionamento dal programma di acquisizione automatica dei dati, installato su un PC collegato alla unità elettronica di controllo.

Oltre ai cicli di spostamenti precedentemente illustrati sono state condotte prove specifiche per studiare caratteristiche particolari dello strumento.

Le misure acquisite sono sempre state di tipo assoluto, per cui si è sempre registrata la misura della mira mobile sulla quale era in esecuzione la prova e quella contemporanea della mira fissa. In questo modo è stato sempre possibile ricavare anche le misure relative. Mediante il programma di acquisizione sono stati registrati anche altri tipi di dati inerenti alla misura:

- misure di test;
- stato di funzionamento di ciascun collimatore, con segnalazione di eventuali errori;
- tempi di integrazione delle misure;
- l'immagine del segnale a due picchi corrispondente ad 1 delle N rilevazioni che, mediate, forniscono la misura.

4.3. - ACQUISIZIONE DI PARAMETRI AMBIENTALI

Per monitorare le condizioni ambientali durante i giorni di svolgimento delle campagne di misura è stata installata una stazione meteorologica sul coronamento della diga, in una posizione tale da poter acquisire le condizioni ambientali medie estendibili a tutti i percorsi ottici tra collimatori e mire luminose. I parametri registrati sono stati la temperatura ambientale, l'umidità relativa, la velocità e la direzione del vento. La frequenza di acquisizione è variata tra un dato ogni ora per le prime campagne fino a 4 dati per ora durante le ultime. Sono state inoltre acquisite le quote d'invaso del lago di Gusana che sono state fornite con frequenza oraria.

4.4. - REGISTRAZIONE DI DATI IN CONTINUO

Il programma di acquisizione dei dati, col quale sono state registrate le misure di ISAC 5000 durante le sessioni di prova, è stato utilizzato anche per l'acquisizione di misure in continuo, sia durante i giorni delle campagne stesse, sia nel periodo tra una campagna e la successiva. Lo scopo delle registrazioni è stato quello di verificare l'affidabilità di ISAC 5000 nel tempo e in particolare di individuare la presenza di effetti sistematici legati alle variazioni dei parametri ambientali nel corso della giornata.

4.5. - MISURE DI COLLIMAZIONE CON OPERATORE

Durante le prove sperimentali sono state eseguite delle misure di collimazione diretta utilizzando gli allineamenti normalmente impiegati per il controllo periodico della diga. Le misure sono state realizzate mediante un teodolite *Wild T2000*; la mira impiegata è stata quella posizionata sopra il pilastro corrispondente alla mira di ISAC 5000 interessata dalla prova (*Fig. 10*). La frequenza delle letture è stata di circa 30' e ciascuna misura risulta dalla media di una serie di osservazioni ripetute. Le misure non sono state eseguite per effettuare un confronto diretto con quelle di ISAC 5000, caratterizzate da una precisione migliore di almeno un ordine di grandezza (si veda quanto osservato al par. 2). Si è voluto tuttavia avere un riscontro dei movimenti della diga mediante un sistema affidabile e indipendente dal sistema sotto analisi, anche se dotato di prestazioni sicuramente inferiori.

5. - VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE METROLOGICHE

In questo paragrafo viene presentata la metodologia impiegata per definire le caratteristiche metrologiche del collimatore ISAC 5000. Occorre innanzitutto mettere in evidenza la carenza di normativa nel settore degli strumenti topografici ed in particolare per quelli dedicati al controllo di dighe. A questo si deve aggiungere che nel passato in Italia è stato prodotto un solo modello di collimatore automatico (DELTA 2000), avente peraltro carattere sperimentale. In conseguenza anche la letteratura che tratta della validazione di questo tipo di strumenti è molto ridotta (Cunietti e Giussani, 1980; Giussani 1981). Per definire le caratteristiche metrologiche di ISAC 5000 è stata dunque definita una metodologia basata sulla *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements* (ISO, IEC, OIML, BIPM, 1992; De Marchi e Lo Presti, 1993), utilizzando i dati acquisiti durante le campagne di misura di Gusana. Nei sottoparagrafi seguenti vengono illustrate le elaborazioni eseguite sulle misure e i risultati ottenuti.

5.1. - ANALISI PRELIMINARE DEI DATI

I dati sperimentali acquisiti durante le campagne di misura sono stati analizzati mediante il calcolo delle differenze tra spostamenti imposti alle mire e misure. Prima di questo è stato necessario eliminare i dati acquisiti durante i primi 3' di ciascun passo di spostamento della slitta micrometrica, tempo necessario per l'aggiornamento del buffer su cui viene calcolata la media. Dalle misure registrate, di tipo assoluto, sono state ricavate mediante la (3) quelle di tipo relativo. A questo punto sono state calcolate le differenze tra misure e spostamenti per entrambi i tipi di osservazioni, sulle quali sono poi stati valutati media e sqm. È stato osservato come le medie non differiscono significativamente da zero, indicando perciò l'assenza di componenti sistematiche di errore. L'unica eccezione è costituita dai dati acquisiti durante la stagione estiva, dove gli effetti della rifrazione atmosferica sono più intensi (comunque non superiori a qualche decimo di mm).

L'analisi degli sqm delle differenze ha evidenziato una dispersione molto ridotta di queste ultime, indicando un'ottima rispondenza del collimatore alle sue prestazioni nominali.

Al termine di questa prima analisi si è proceduto alla valutazione delle seguenti caratteristiche metrologiche: a) campo di misura; b) linearità del sensore; c) incertezza strumentale; d) ripetibilità delle misure; e) risoluzione.

5.2. - CAMPO DI MISURA

Nell'indicare il campo di misura di ISAC 5000 si è dovuto tenere conto del fatto che la posizione della mira può essere valutata fino a quando entrambe le curve corrispondenti alle fenditure sono completamente contenute sulla matrice lineare di sensori CCD. È stato calcolato dapprima l'abbracciamento del collimatore *i-esimo* alla distanza d_i :

$$(5) \quad c_i = \frac{d_i}{f} l_a = [4,493 \cdot d_i(m)] \quad (mm)$$

dove f è la focale del cannocchiale e l_a la larghezza della matrice di CCD (pari a 22,464 mm). Il campo di misura effettivo c_{eff} risulta ridotto di una larghezza pari a 2 volte l'interasse I tra le mire:

$$(6) \quad c_{eff} = c_i - 2I \quad (mm)$$

5.3. - LINEARITÀ DEL SENSORE

Lo studio della *linearità del sensore* di ISAC 5000 ha preceduto la definizione delle altre caratteristiche metrologiche, in quanto si è ritenuto che l'eventuale conoscenza di una *funzione di taratura* dello strumento potesse essere utile per correggere le misure da analizzare. Si è dunque valutato se le differenze tra le misure di tipo assoluto e gli spostamenti imposti si fossero mantenute costanti nell'intero campo di misura.

Le analisi svolte hanno evidenziato che le misure dei collimatori di Gusana sono caratterizzate da un errore di taratura di tipo lineare, avente un comportamento simmetrico rispetto al centro dell'*array* e quindi rispetto all'asse longitudinale dello strumento. Si ritiene che questo errore sia dovuto ad una imprecisa taratura della costante strumentale (valore determinato nella procedura di messa in servizio). Sono state definite le relazioni seguenti mediante le quali è possibile correggere le misure assolute dall'errore di taratura:

$$(7) \quad m_A^* = m_A - a_1|m_A| - a_0 \quad (m_A \geq 0) \quad m_A^* = m_A + a_1|m_A| + a_0 \quad (m_A < 0)$$

dove con m_A^* sono state indicate le misure corrette e con m_A quelle osservate da ISAC 5000. I coefficienti correttivi a_0 (traslazione) e a_1 (fattore di scala) sono stati stimati con precisioni $\sigma_{a_1} = \pm 0,002$ e $\sigma_{a_0} = \pm 0,080$ mm.

Questi algoritmi sono stati applicati per correggere le misure acquisite durante le campagne di misura e utilizzate poi per stimare i parametri metrologici dello strumento.

In Fig. 11 si può osservare un grafico di esempio nel quale si riporta in ascissa la misura di ISAC 5000 e in ordinata la differenza tra lo spostamento imposto alla slitta e la misura stessa; nel grafico sono riportate anche la retta di taratura e i residui dopo la correzione.

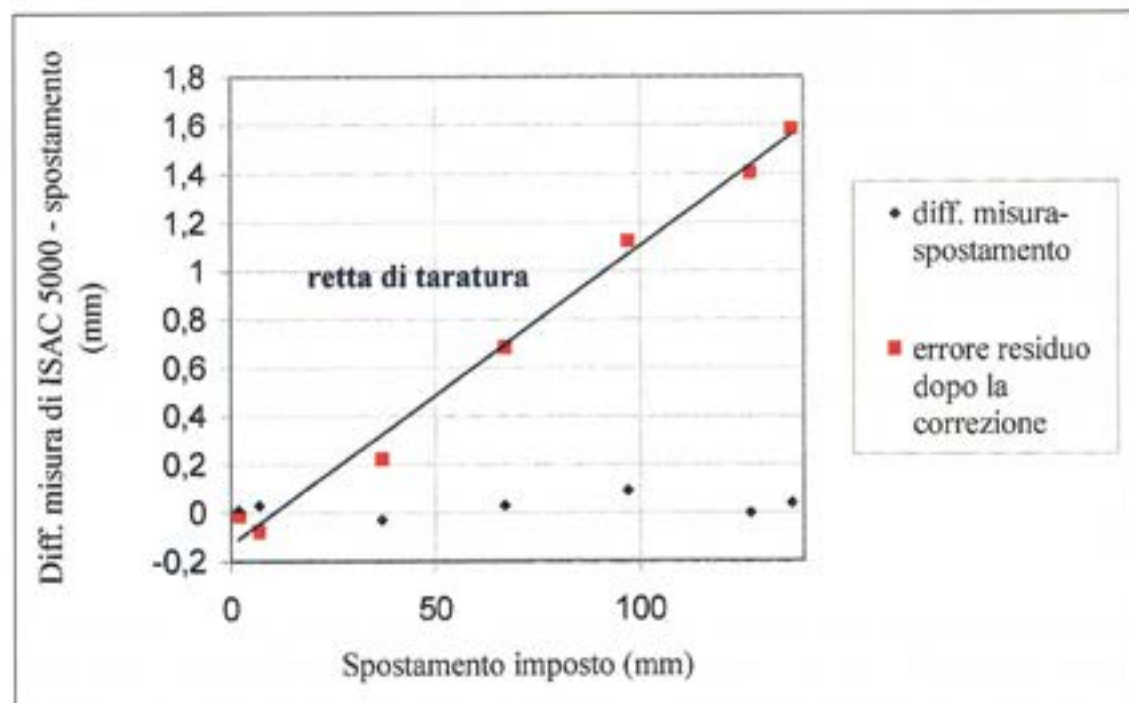


Fig. 11 - Grafico rappresentante le differenze tra gli spostamenti e le misure di ISAC 5000 prima e dopo l'applicazione della funzione di taratura stimata (le misure sono relative alla mira 3 durante la campagna del Luglio 1997 a Gusana).

5.4. - INCERTEZZA STRUMENTALE

L'incertezza strumentale viene associata al valore di misura, assegnato mediante la curva di taratura, per indicare quello che non si è riusciti a conoscere del misurando. Viene definita come la più grande differenza possibile (ad un certo livello di probabilità) tra una singola misura ed il valore più probabile del misurando. Il livello di probabilità è stato fissato pari al 99,74 %, che corrisponde ad una valutazione dell'incertezza pari all'intervallo $\pm 3\sigma$ di una distribuzione normale.

L'incertezza strumentale dipende ovviamente dalla distanza collimatore-mira e pertanto per la sua valutazione si sono prese in considerazione le misure delle 3 mire sulle quali sono state eseguite le prove. La stima di questo parametro è stata effettuata secondo la procedura seguente per entrambi i tipi di misure (assolute e relative):

1. sono state selezionate alcune sessioni di prove ritenute campioni rappresentativi;
2. sono state corrette le misure assolute mediante gli algoritmi di taratura (7);
3. sono state calcolate le misure relative tramite la (3);
4. è stata stimata a minimi quadrati la traslazione q che minimizza le differenze tra misure e spostamenti imposti, in modo da riferire le due serie di dati alla stessa origine;
5. sono state calcolate le differenze Δ_m tra misure m e spostamenti S (tenendo conto della traslazione q tra le origini dei due sistemi di riferimento):

$$(8) \quad \Delta_m = m - S - q$$

6. sono stati calcolati media M_Δ e $\text{sqm } \sigma_\Delta$ delle differenze per ciascuna sessione;
7. è stata verificata la normalità della distribuzione delle differenze mediante *test di Pearson-d'Agostino* (Sansò, 1993);
8. è stato verificato mediante *test di Student* che le medie delle differenze non differiscono significativamente dal valore atteso in assenza di componenti sistematiche di errore (assunto pari a 0,0 mm);
9. sono stati calcolati gli RMS delle differenze Δ_m per ciascuna mira considerando tutte le sessioni di prove analizzate; da questo valore è stata poi definita l'incertezza strumentale come:

$$(9) \quad S_A = \pm 3 \text{ RMS}$$

Una volta stimate le incertezze delle misure alle singole mire sono stati definiti dei valori aventi validità generale. Si è ritenuto che l'incertezza delle misure assolute di ISAC 5000 vada ricavata dalla mira fissa, in quanto su di essa non influiscono i movimenti della diga. In questo modo è stato definito il valore dell'incertezza delle misure assolute in funzione della distanza tra mira e collimatore utilizzando un modello lineare:

$$(10) \quad S_A = \pm [C_A \times d (m)] (mm) \quad C_A = 1,9 \times 10^{-3} (mm/m)$$

La costante C_A è stata calcolata conoscendo i valori di S_A ricavati sperimentalmente e la distanza della mira fissa dal suo collimatore. L'impiego di un modello lineare per esprimere l'incertezza strumentale in funzione della distanza tra mira e collimatore è cautelativo; infatti, essendo stato calcolato a partire dall'incertezza della mira più lontana, risentirà maggiormente degli effetti della rifrazione atmosferica, che non sono lineari.

Per quanto riguarda le misure di tipo relativo, l'incertezza risulta teoricamente maggiore rispetto a quella delle misure di tipo assoluto, in quanto dipende anche dalla mira fissa. Per questo motivo

è stato calcolato un valore teorico in funzione dell'incertezza delle misure assolute alla mira posta sul punto di controllo e di quelle alla mira fissa. In questa valutazione si è supposto che le distanze d_i siano note con una precisione sufficiente, in modo da poter considerare ininfluenza l'incertezza nella loro determinazione. Applicando la legge di propagazione della varianza alla (3) è possibile ricavare la varianza σ_R^2 :

$$(11) \quad \sigma_R^2 = \left(\frac{\partial m_R}{\partial m_A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial m_R}{\partial m_0}\right)^2 \sigma_0^2 + 2 \left(\frac{\partial m_R}{\partial m_A}\right) \left(\frac{\partial m_R}{\partial m_0}\right) \sigma_{A0} = \sigma_A^2 + \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \sigma_0^2 - 2 \left(\frac{d}{d_0}\right) \sigma_{A0}$$

Le varianze σ_A^2 e σ_0^2 (varianza delle misure alla mira fissa) possono essere ricavate applicando la relazione (10). La covarianza σ_{A0} , di difficile determinazione sperimentale, è stata considerata trascurabile in quanto il suo contributo è a favore di sicurezza. Infatti è stato verificato sperimentalmente che le misure alle diverse mire risentono in modo analogo delle variazioni dell'indice di rifrazione atmosferica. Per questa ragione la covarianza tra le misure alla mira *i-esima* e quelle alla mira fissa è stata considerata sempre positiva e perciò la varianza σ_R^2 delle misure relative risulta sovrastimata trascurando σ_{A0} . La varianza delle misure relative è risultata perciò:

$$(12) \quad S_R = \pm 3\sigma_R = \pm 3 \cdot \frac{C_A}{3} \sqrt{2} \cdot d = \pm [\sqrt{2} \cdot C_A d \text{ (m)}] \text{ (mm)}$$

L'incertezza teorica delle misure relative è stata ricavata come:

$$(13) \quad S_R = \pm 3\sigma_R = \pm 3 \cdot \frac{C_A}{3} \sqrt{2} \cdot d = \pm [\sqrt{2} \cdot C_A d \text{ (m)}] \text{ (mm)}$$

In Tab. 4 sono riportati i valori riassuntivi di riferimento per l'incertezza strumentale di ISAC 5000, insieme alle altre caratteristiche metrologiche di cui si tratta nel seguito.

Si vuole infine mettere in evidenza come le misure relative, anche se di precisione inferiore, sono più affidabili di quelle assolute. Infatti, come è riportato al par. 6, l'utilizzo delle misure alla mira fissa permette di ridurre l'effetto della variazione dell'indice di rifrazione atmosferica, che risulta poco rilevante nei periodi di tempo della durata di poche ore, ma non è più trascurabile se si acquisiscono i dati nel corso delle 24 ore, come ISAC 5000 è predisposto a fare.

Si riportano nelle Figg. 12 e 13 due grafici riguardanti le misure acquisite durante la campagna del Maggio 1997 sulla mira 3 (mattino), nei quali si può osservare come le misure relative non seguono il trend presente in quelle assolute, dovuto probabilmente alla variazione dell'indice di rifrazione atmosferica.

parametro	tipo di misure	formula di calcolo (mm)	valore f.s. calcolato	valore f.s. dichiarato da ISMES ¹⁾
CAMPO DI MISURA	ass./relat.	$c_i = 4,493 d_i \text{ (m)}$	—	—
INCERTEZZA	assolute	$S_A = 1,9 \times 10^{-3} d_i \text{ (m)}$	0,04%	0,2%
	relative	$S_R = 2,7 \times 10^{-3} d_i \text{ (m)}$	0,06%	
RIPETIBILITÀ	assolute	$R_A = 1,5 \times 10^{-3} d_i \text{ (m)}$	0,03%	0,1%
	relative	$R_R = 2,1 \times 10^{-3} d_i \text{ (m)}$	0,05%	
RISOLUZIONE	assolute	$r_A = 1,9 \times 10^{-3} d_i \text{ (m)}$	0,04%	0,05%
	relative	$r_R = 2,7 \times 10^{-3} d_i \text{ (m)}$	0,05%	

Tabella 4 - Tavola riassuntiva dei parametri metrologici del collimatore ISAC 5000.

¹⁾ I parametri metrologici dichiarati da ISMES non fanno riferimento al tipo di misure (relative o assolute) cui si riferiscono.

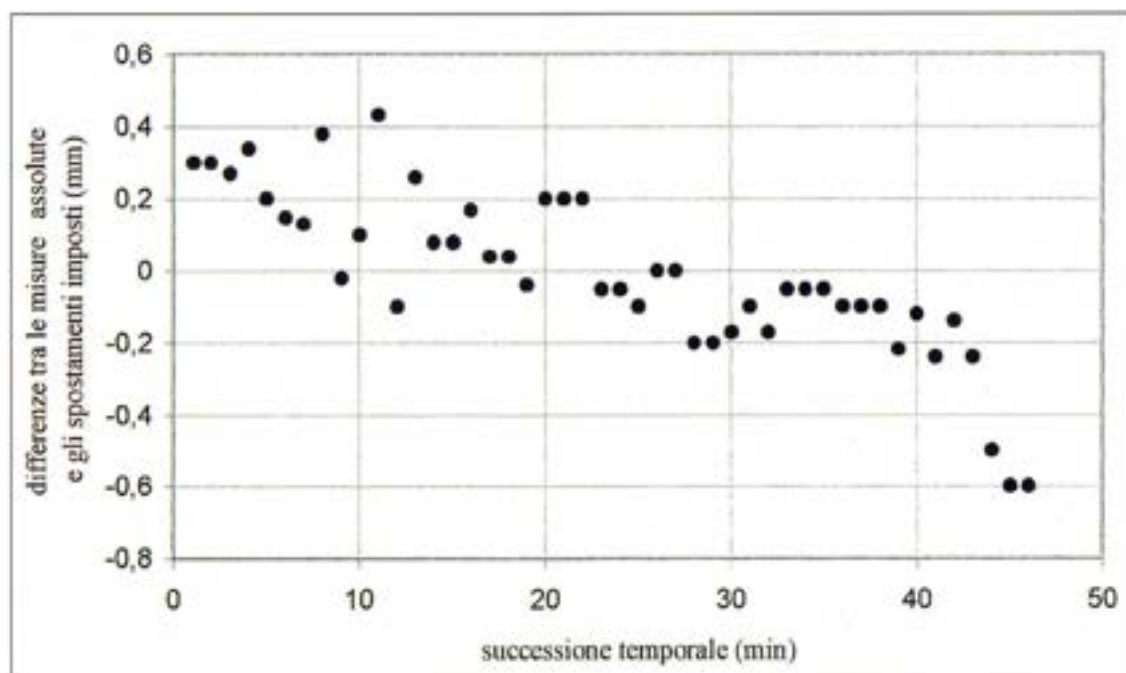


Fig. 12 - Differenze tra le misure assolute di ISAC 5000 e gli spostamenti imposti (mira 3 - Maggio 1997, sessione di prove del mattino).

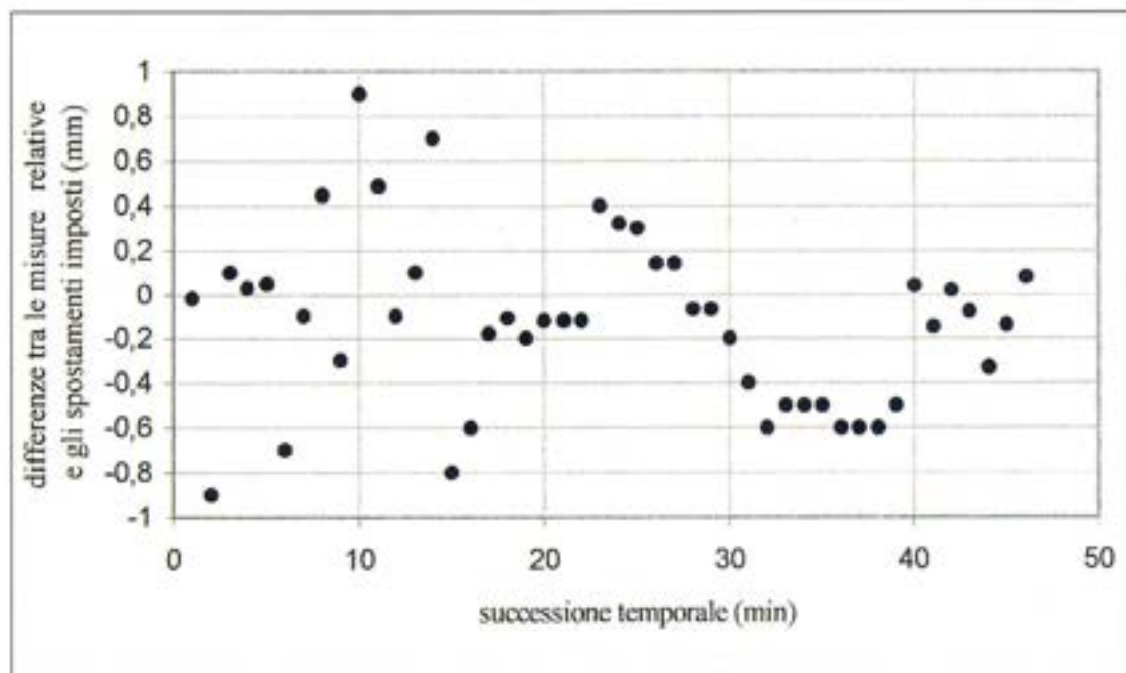


Fig. 13 - Differenze tra le misure assolute di ISAC 5000 e gli spostamenti imposti (mira 3 - Maggio 1997, sessione di prove del mattino).

5.4. - RIPETIBILITÀ DELLE MISURE

La ripetibilità è l'attitudine di uno strumento a fornire valori di lettura poco differenti fra loro, in letture consecutive eseguite indipendentemente sullo stesso misurando, con procedimento unificato, nelle stesse condizioni per le grandezze d'influenza. Il valore assegnato a questo parametro definisce l'intervallo entro il quale si prevede cada una percentuale assegnata dei valori di lettura ottenuti da uno strumento, per uno stesso misurando. Il livello di probabilità è stato fissato pari al 95%, che corrisponde ad una banda $\pm 2\sigma$ di una distribuzione normale.

I valori della ripetibilità per le misure relative e assolute sono stati stimati secondo la procedura seguente considerando le serie di misure che risultano al termine del punto 3 della procedura per il calcolo dell'incertezza strumentale:

1. sono state calcolate le medie M_i delle misure corrispondenti a ciascun passo di spostamento S_i ;
2. sono state considerate le coppie di misure acquisite in momenti diversi alle stesse posizioni della slitta micrometrica ($S_i = S_j$), e per ciascuna di esse è stata calcolata la differenza tra le medie M_i e M_j corrispondenti (errore di riposizionamento):

$$(14) \quad \Delta_{ij} = M_i - M_j$$

3. sono stati calcolati media M_Δ e sqm σ_Δ delle differenze Δ_{ij} per ciascuna sessione;
4. è stata verificata la normalità della distribuzione delle differenze mediante *test di Pearson-d'Agostino*;
5. è stato verificato mediante *test di Student* che le medie delle differenze non differiscono significativamente dal valore atteso in assenza di componenti sistematiche di errore (assunto pari a 0,0 mm);
6. sono stati calcolati gli RMS delle differenze Δ_{ij} per ciascuna mira considerando tutte le sessioni di prove analizzate; da questo valore è stata poi definita la ripetibilità come:

$$(15) \quad R_A = \pm 2 \text{ RMS}$$

La ripetibilità delle misure assolute (R_A) e di quelle relative (R_R) è stata valutata con un procedimento analogo a quello utilizzato per l'incertezza strumentale:

$$(16) \quad R_A = [C_{RA} \times d_i (m)] \quad (mm) \quad C_{RA} = 1,5 \times 10^{-3} \quad (mm/m)$$

$$(17) \quad R_R = \sqrt{2} \cdot R_A = [\sqrt{2} \cdot C_{RA} d_i (m)] \quad (mm)$$

In *Tab. 4* sono riportati i valori riassuntivi di riferimento per la ripetibilità delle misure di ISAC 5000.

5.6. - RISOLUZIONE

La risoluzione è l'attitudine di un dispositivo per misurazione a distinguere tra due valori vicini, ma diversi, del misurando. Il valore della risoluzione è costituito da quella variazione del valore del misurando che provoca una modificazione del più piccolo valore di lettura apprezzabile. Viene espressa come intervallo $\pm 2\sigma$ di una distribuzione normale, corrispondente alla distanza tra due valori vicini che sono giudicati diversi con una confidenza del 68%.

La risoluzione di ISAC 5000 è stata determinata secondo la procedura seguente, considerando solo i cicli di spostamenti con passi di 0,2 mm relativi alle mire 1 e 3 che sono risultati al termine del punto 3 della procedura per il calcolo dell'incertezza strumentale:

1. sono state calcolate per ciascuna sessione di prove le medie delle misure M_j corrispondenti a ciascun passo di spostamento (S_j);
2. sono state considerate 5 variazioni del valore del misurando ($r_i, i=1, \dots, 5$) corrispondenti ai passi di spostamento imposti durante le prove; tali variazioni costituiscono i valori teorici della risoluzione tra i quali dovrà essere definito il valore effettivo:

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
0,2 mm	0,4 mm	0,6 mm	0,8 mm	1,0 mm

per ciascuna variazione del valore del misurando r_i , sono state individuate quelle misure alle quali corrispondono spostamenti imposti (S_j, S_k) tali che:

$$(18) \quad r_i = |S_j - S_k|$$

3. per le misure associate a ciascun r_i , è stata calcolata la differenza di tra le loro medie:

$$(19) \quad \delta_i = |M_j - M_k|$$

4. è stata calcolata la media Δ_i delle differenze δ_i per ciascun r_i ; questa operazione è stata ripetuta per le 4 sessioni di prove considerate per le mire 1 e 3;

5. è stata valutata, caso per caso, l'entità della minima variazione del misurando (r_{min}) a cui corrisponde una variazione della lettura effettuata da ISAC 5000 (M'_{min}) apprezzabile, ottenendo i valori sperimentali della risoluzione per i due collimatori di Gusana posizionati sulle mire 1 e 3.

La risoluzione delle misure assolute (r_A) e di quelle relative (r_R) è stata poi valutata in modo analogo a quanto già visto per gli altri parametri metrologici:

$$(20) \quad r_A = [C_r \times d_i (m)] (mm) \quad C_r = 1,9 \times 10^{-3} (mm/m)$$

$$(21) \quad r_R = \sqrt{2} \cdot r_A$$

In Tab. 4 sono riportati i valori riassuntivi di riferimento per la risoluzione di ISAC 5000.

6. - STUDIO DELL'INFLUENZA DEI PARAMETRI AMBIENTALI SULLE MISURE

L'analisi delle misure acquisite durante le campagne svoltesi a Gusana e dei dati provenienti da Ambiesta e Comelico ha evidenziato un comportamento variabile del collimatore ISAC 5000 nei diversi momenti della giornata. I parametri ambientali (temperatura, umidità relativa, pressione atmosferica, irraggiamento solare, ecc.) influiscono sulle misure in quanto provocano una variazione dell'indice di rifrazione atmosferica locale all'interno degli strati d'aria orizzontali. Il fenomeno è accentuato nel periodo che inizia dalle prime ore della giornata sino al primo pomeriggio, quando l'irraggiamento solare provoca delle correnti d'aria calda con notevoli variazioni dell'indice di rifrazione.

Si vogliono mettere in luce alcune osservazioni che consentono di inquadrare meglio il problema. Il legame tra i parametri ambientali e l'indice di rifrazione atmosferica è piuttosto complesso e dipende strettamente dalla geomorfologia e dal microclima dell'ambiente in cui si opera; questo rende sconsigliabile l'utilizzo di modelli generali del fenomeno e richiede uno studio accurato del problema per ciascuna diga in cui si vuole installare ISAC 5000²⁾. Questa analisi dovrebbe inoltre avvalersi di un'acquisizione di dati meteorologici molto consistente, che richiederebbe delle specifiche campagne di misura il cui costo non potrebbe essere compensato dai risultati ottenibili al fine di contribuire al miglioramento della qualità delle misure. Anche disponendo di un modello locale dell'indice di rifrazione atmosferica, la sua applicazione per la correzione delle misure di ISAC 5000 richiederebbe un'acquisizione intensa di dati meteorologici durante il funzionamento regolare dello strumento; tale raccolta dovrebbe poi avvenire mediante un numero elevato di sensori, in modo da poter ricostruire in modo preciso il microclima locale dell'impianto. Queste due osservazioni costringono a rinunciare a un approccio che preveda la definizione di un modello della rifrazione atmosferica locale. È stata perciò adottata un'altra metodologia, che consiste nel valutare quale sia l'influenza del fenomeno in termini di aumento dell'incertezza delle misure di ISAC 5000.

6.1. - VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELL'INFLUENZA DELLA RIFRAZIONE ATMOSFERICA

Durante la campagna di misura del Luglio 1997 è stata realizzata una rete topografica (in Fig. 14 è riportato lo schema planimetrico) avente lo scopo di valutare l'entità dell'errore che la variazione dell'indice di rifrazione atmosferica provoca nelle misure. Sono stati utilizzati due teodoliti del primo ordine di proprietà dell'ENEL: una stazione totale WILD T2000, posizionata sul pilastrino γ nelle vicinanze della cabina dei collimatori e un teodolite WILD T3, posizionato sul pilastrino 5 a pochi metri dalla mira fissa. Dal punto γ sono state collimate le mire poste sui pilastrini 25 e 2 (non è stato utilizzato il pilastrino 5 in quanto privo di mira), in modo da determinare l'angolo α ; analogamente facendo stazione sul pilastrino 5 e collimando le mire poste sui pilastrini γ e 25 si è determinato l'angolo β . Tenuto conto che i percorsi di collimazione da γ al pilastrino 2 e da 2 a γ sono praticamente coincidenti con quello dalla mira fissa verso il rispettivo collimatore, eventuali variazioni significative degli angoli misurati si prestano a utili considerazioni. Le misure sono state eseguite in due sessioni, svoltesi nel corso di due mattine, proprio perché il disturbo investigato presenta la massima intensità in questo periodo della giornata. Si sono inoltre scelte due giornate caratterizzate da condizioni meteorologiche differenti (soleggiata la prima e con cielo coperto la seconda) per poter confrontare l'incidenza del fenomeno in condizioni ambientali diverse. Le misure sono state ripetute ogni 30' in modo contemporaneo dalle due stazioni. Dal momento che l'entità delle variazioni delle misure è al limite dell'incertezza degli strumenti utilizzati, ciascuna misura è stata ripetuta più volte in modo indipendente.

I risultati ottenuti vengono illustrati nei grafici riportati nelle Figg. 15a e 15b. Come ci si attendeva, si nota una variabilità angolare nettamente superiore nella mattina soleggiata rispetto a quella con cielo coperto. Inoltre, mentre la mattina caratterizzata dall'assenza di sole sembra rispecchiare una variabilità pressoché casuale, nella mattina soleggiata appare evidente la presenza di una variazione localizzata tra le 11.00 e le 12.30. Questo andamento è risultato simile a quello riscontrato sulle misure alla mira fissa di ISAC 5000 acquisite contemporaneamente a questa prova. È interessante notare come nella giornata soleggiata i due angoli α e β variano concordemente, in accordo con le variazioni intense dell'indice di rifrazione atmosferica. Nel corso della prova con cielo coperto le misure hanno invece evidenziato una dispersione minore e di tipo casuale, in quanto non imputabile ad un effetto sistematico. Traspare inoltre una maggior dispersione nei valori dell'angolo β , giustificata sia dall'utilizzo di un teodolite meno preciso, sia dalla maggiore vicinanza tra i pilastrini γ e 25.

²⁾ Un esempio di questo tipo di modelli si può trovare in Fea (1966).

I valori massimi delle variazioni angolari che sono stati riscontrati corrispondono a variazioni delle misure della mira fissa di circa 6,0 mm nella giornata soleggiata e di circa 2,5 mm nella giornata con cielo coperto.

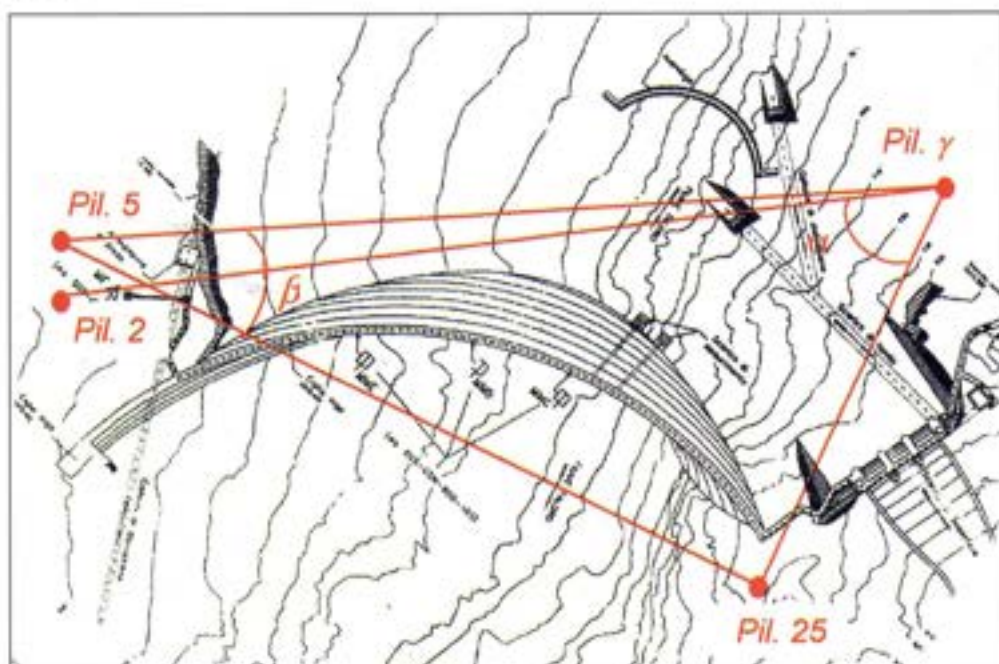


Fig. 14 - Planimetria della diga di Gusana con indicazione della rete topografica utilizzata per valutare l'entità dell'errore dovuto alla rifrazione atmosferica.

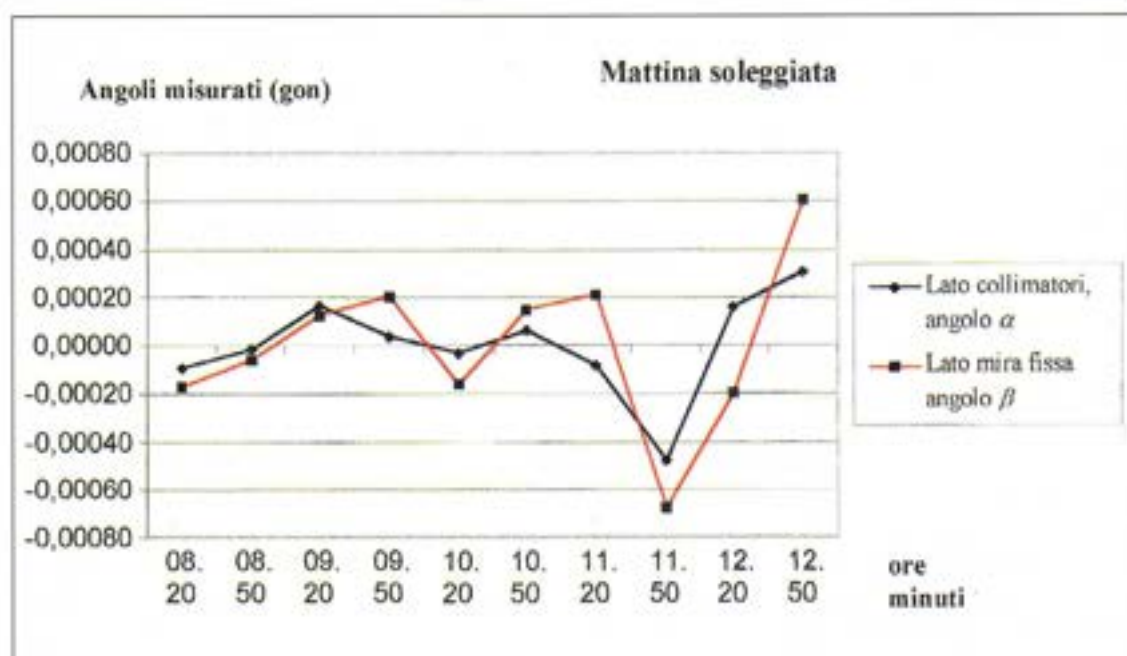


Fig. 15a - Risultati delle misure topografiche, effettuate durante la mattina soleggiata, per valutare l'effetto della rifrazione atmosferica sulle misure di angoli orizzontali.

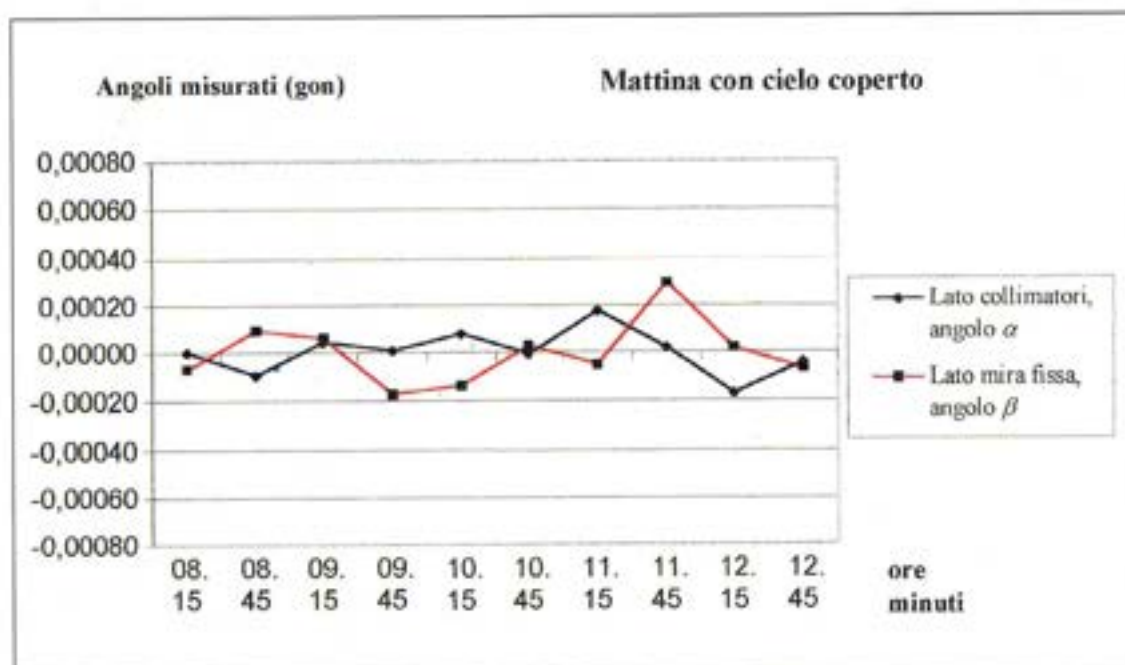


Fig. 15b - Risultati delle misure topografiche, effettuate durante la mattina con cielo coperto, per valutare l'effetto della rifrazione atmosferica sulle misure di angoli orizzontali.

6.2. - ANALISI DEL PROBLEMA DELLA RIFRAZIONE ATMOSFERICA

Per capire come la rifrazione atmosferica influisca sulle misure del collimatore ISAC 5000 sono state analizzate alcune serie temporali di dati acquisiti in modo continuativo sull'impianto di Gusana. Per meglio illustrare il problema si riportano due grafici (Fig. 16) nei quali sono rappresentate le misure assolute e relative acquisite nell'arco di un'intera giornata (Luglio 1996), che può essere considerata come ben rappresentativa di quanto normalmente accade. Le misure assolute della mira fissa presentano una variazione di ampiezza pari a circa 4,0 mm, che si ripercuote con andamento analogo sulle altre mire. Essa ha inizio nelle prime ore del mattino e raggiunge il massimo in valore assoluto verso le ore 11.00, dopodiché la misura recupera lentamente un valore stabile al quale arriva verso le ore 20.00; questo viene poi mantenuto nel corso della notte. È ragionevole supporre che il problema sia causato dalla variazione dell'indice di rifrazione, in quanto concorda con l'entità degli spostamenti imputabili alla rifrazione valutata mediante la rete topografica. Le misure relative mostrano invece una maggiore regolarità degli spostamenti delle mire sulla diga; si può quindi concludere che l'impiego di questo tipo di osservazioni permette di ridurre l'errore dovuto alla rifrazione atmosferica. Dopo avere individuato la natura del problema e il suo comportamento durante il corso della giornata, si è cercato di valutarne quantitativamente l'entità. Questa analisi ha presentato come principale problema il fatto di non conoscere le misure "vere", per cui si è cercato di partire dalla valutazione del segnale registrato, tentando di estrarre da quest'ultimo elementi che aiutassero a chiarire il problema. Poiché le analisi numeriche svolte esigevano delle serie temporali di dati continui aventi frequenza costante, è stato considerato un blocco di misure della durata di 24 giorni, all'interno del quale l'acquisizione non ha avuto interruzioni. I dati così individuati, acquisiti ogni 15 minuti, presentavano alcune misure mancanti che sono state integrate mediante interpolazione lineare tra i valori precedenti e quelli successivi alle interruzioni stesse; il numero complessivo di dati interpolati è stato di 24 su 2298. Al termine del pre-processamento dei dati è stata eseguita l'analisi in frequenza delle serie temporali costituite dalle misure degli spostamenti delle mire.

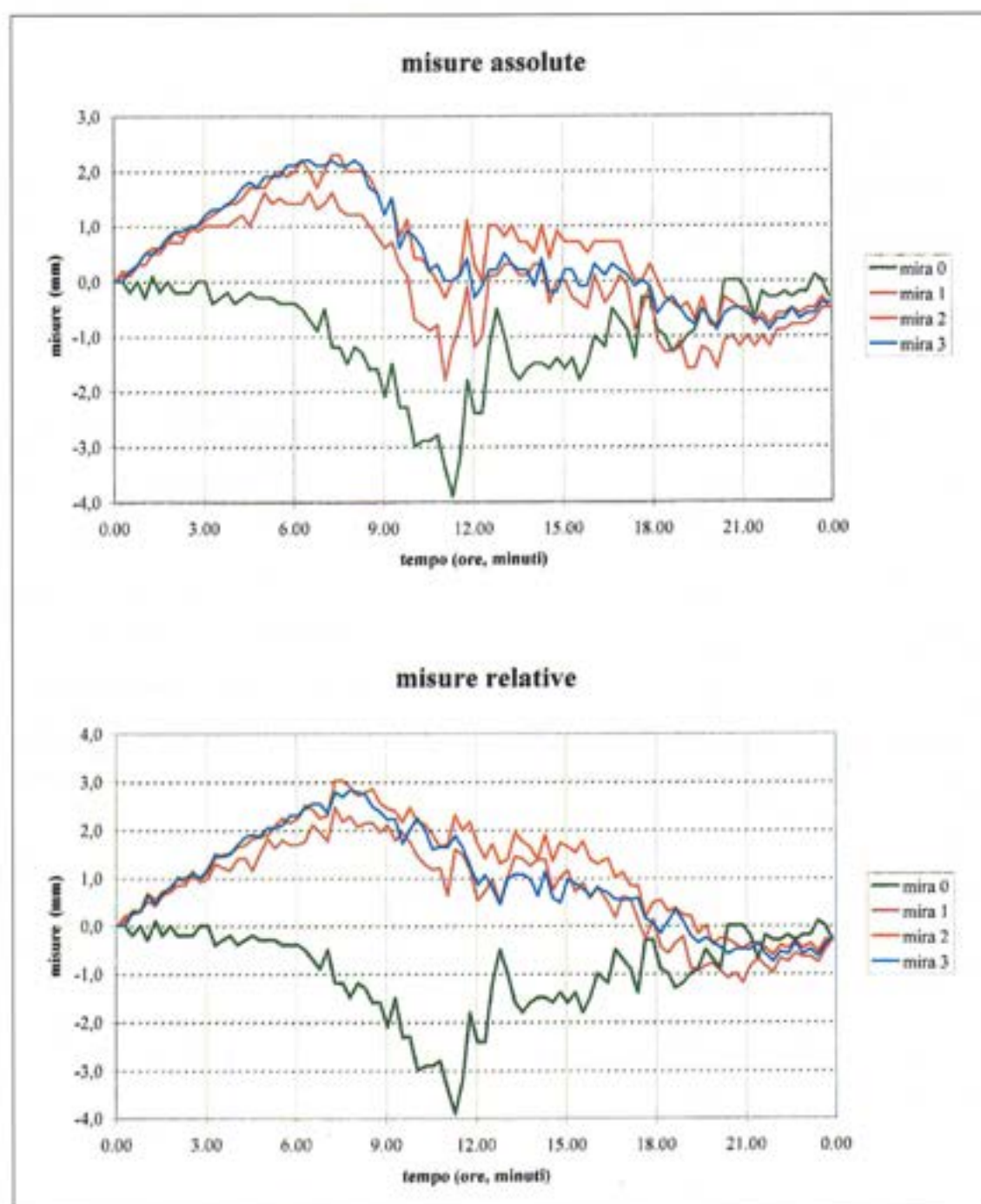


Fig. 16 – Misure assolute e relative acquisite il 1° Luglio 1996, assunto a giornata tipo.

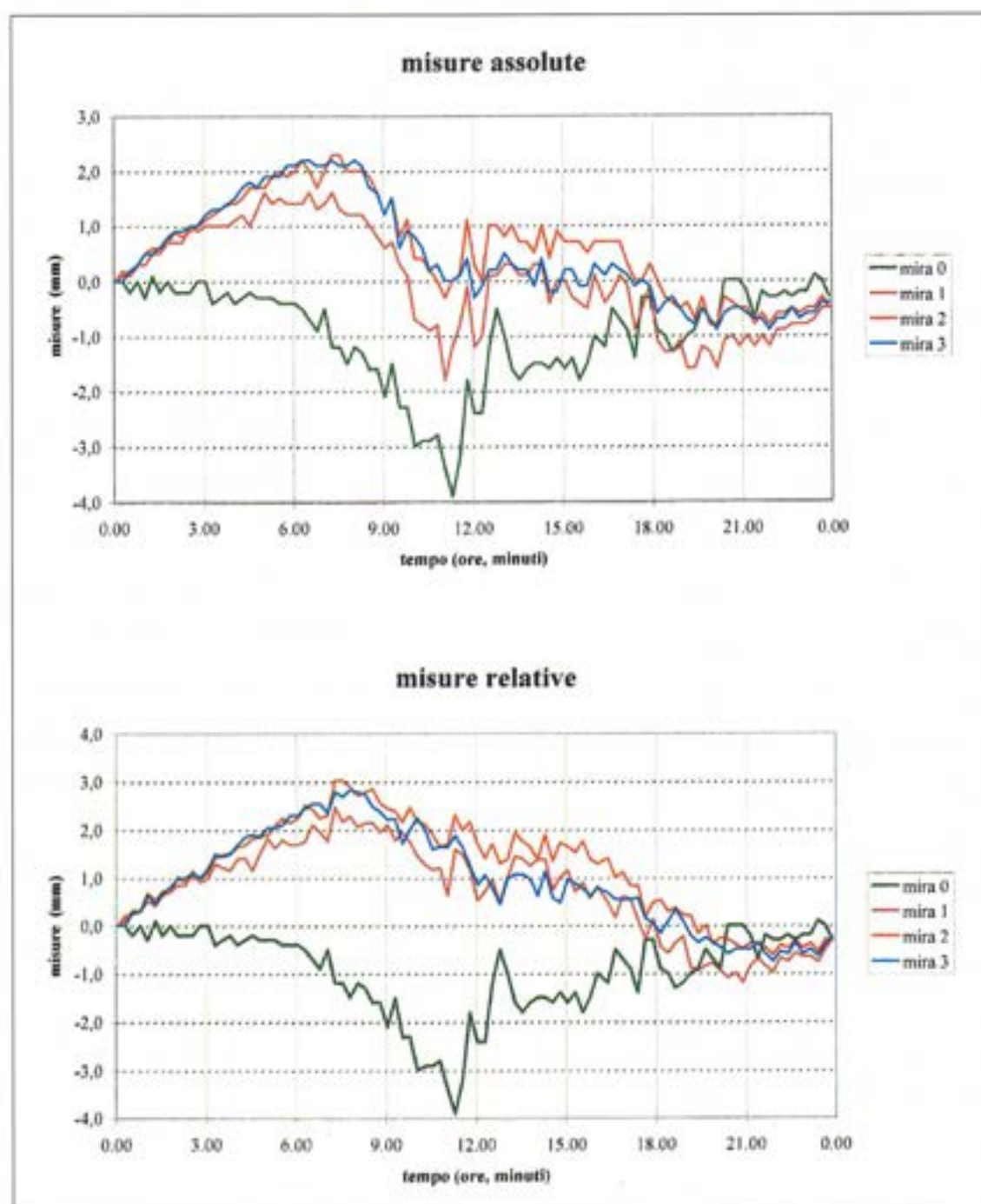


Fig. 16 – Misure assolute e relative acquisite il 1° Luglio 1996, assunto a giornata tipo.

6.3. - ANALISI IN FREQUENZA DELLE MISURE

L'analisi in frequenza di un segnale, quale si possono considerare le misure di ISAC 5000, consiste nella ricerca delle periodicità temporali che lo compongono mediante una trasformazione dal dominio del tempo a quello della frequenza effettuata mediante l'algoritmo *Fast Fourier Transform*³. L'obiettivo di questo studio è stato quello di rimuovere le componenti periodiche fondamentali del segnale nel lungo periodo (stagionale) e nel breve periodo (giornaliero), in modo da isolare l'errore dovuto alla rifrazione atmosferica e il rumore. Le misure utilizzate sono state quelle di tipo relativo poiché, come è stato osservato al paragrafo precedente, riducono l'effetto della rifrazione atmosferica. Scopo di questa analisi è stato quello di indagare quale fosse l'errore residuo nelle misure relative. In Fig. 17 vengono riportati i grafici rappresentanti il contenuto in frequenza dei segnali costituiti dalle misure alle 4 mire presenti nell'impianto di Gusana. Quanto emerge appare molto significativo e permette di effettuare alcune considerazioni. Lo spettro del segnale relativo alle mire posizionate sulla diga mostra chiaramente la presenza di un picco alle basse frequenze, che rappresenta l'andamento periodico stagionale del segnale nell'arco di tempo considerato. In corrispondenza della frequenza di $1,16 \times 10^{-5}$ Hz, equivalente ad un periodo di 24 ore, è presente un nuovo picco di ampiezza minore, rappresentativo dello spostamento periodico giornaliero della diga. In ultimo troviamo immancabilmente un rumore di fondo, distribuito pressoché uniformemente, rappresentativo della presenza inevitabile di errori accidentali. Per quanto riguarda la mira fissa, in corrispondenza della frequenza giornaliera troviamo le armoniche con ampiezza maggiore, tutte riconducibili all'anomalia giornaliera dovuta alla rifrazione atmosferica (in Fig. 19 è riportato il segnale corrispondente alla mira fissa per il periodo analizzato). È comunque evidente l'estensione ridotta del picco in questione, se paragonato a quello delle mire mobili, mancando in questo caso lo spostamento proprio della struttura. Inoltre troviamo anche qui il rumore di fondo, mentre mancano ovviamente le armoniche in bassa frequenza caratterizzanti il segnale delle mire sul coronamento, denunciando perciò, come atteso, un trend di spostamenti della mira fissa nullo.

Al termine dell'analisi delle frequenze che compongono i segnali è stato eseguito un filtraggio dei dati con lo scopo di eliminare da questi l'effetto del trend e dei movimenti giornalieri della diga. Il segnale residuo è stato considerato come un rumore residuo la cui origine è prevalentemente da attribuire all'effetto della rifrazione atmosferica. In Fig. 18 vengono riportati 3 grafici che illustrano le fasi del filtraggio eseguito sul segnale della mira 1 di Gusana:

- il segnale originario (in blu) e il *trend* (in rosso);
- il segnale residuo (in blu) ottenuto dalla differenza tra il segnale originario e il *trend*, che contiene prevalentemente l'effetto della periodicità giornaliera (in rosso);
- il rumore residuo (in blu) ottenuto come differenza tra i due segnali riportati nel grafico precedente.

Dall'analisi in frequenza del segnale si è potuto dedurre che gli errori residui dopo il filtraggio dei dati, imputabili alle variazioni orizzontali dell'indice di rifrazione atmosferica, hanno un valore inferiore rispetto all'incertezza di misura del collimatore ISAC 5000 (Tab. 5). L'utilizzo della trasformazione lineare (3) per correggere l'errore causato dalla rifrazione atmosferica è da noi quindi ritenuto come il modello più affidabile.

	d_i (m)	INCERTEZZA DELLE MISURE		ERRORE DOVUTO ALLA RIFRAZIONE	
		nominale (mm)	sperimentale (mm)	RMS (mm)	max (mm)
MIRA 1	288	2,6	0,8	0,5	1,1
MIRA 2	237	2,1	0,6	0,5	-1,3
MIRA 3	194	1,7	0,5	0,5	-1,5

Tab. 5 - Parametri statistici relativi all'errore residuo.

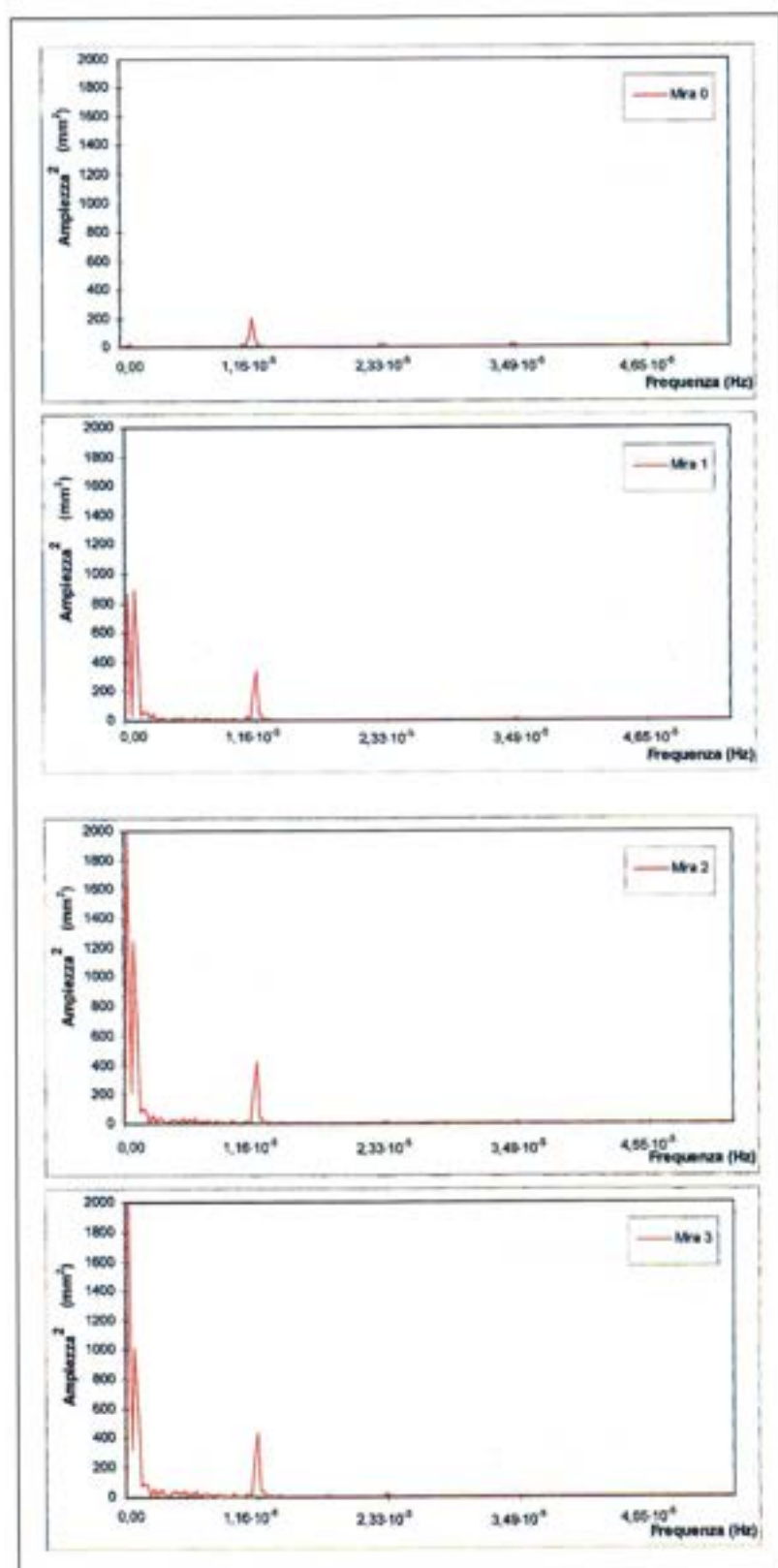


Fig. 17 – Contenuto in frequenza dei segnali corrispondenti alle misure (di tipo relativo per i punti di controllo e di tipo assoluto per la mira fissa).

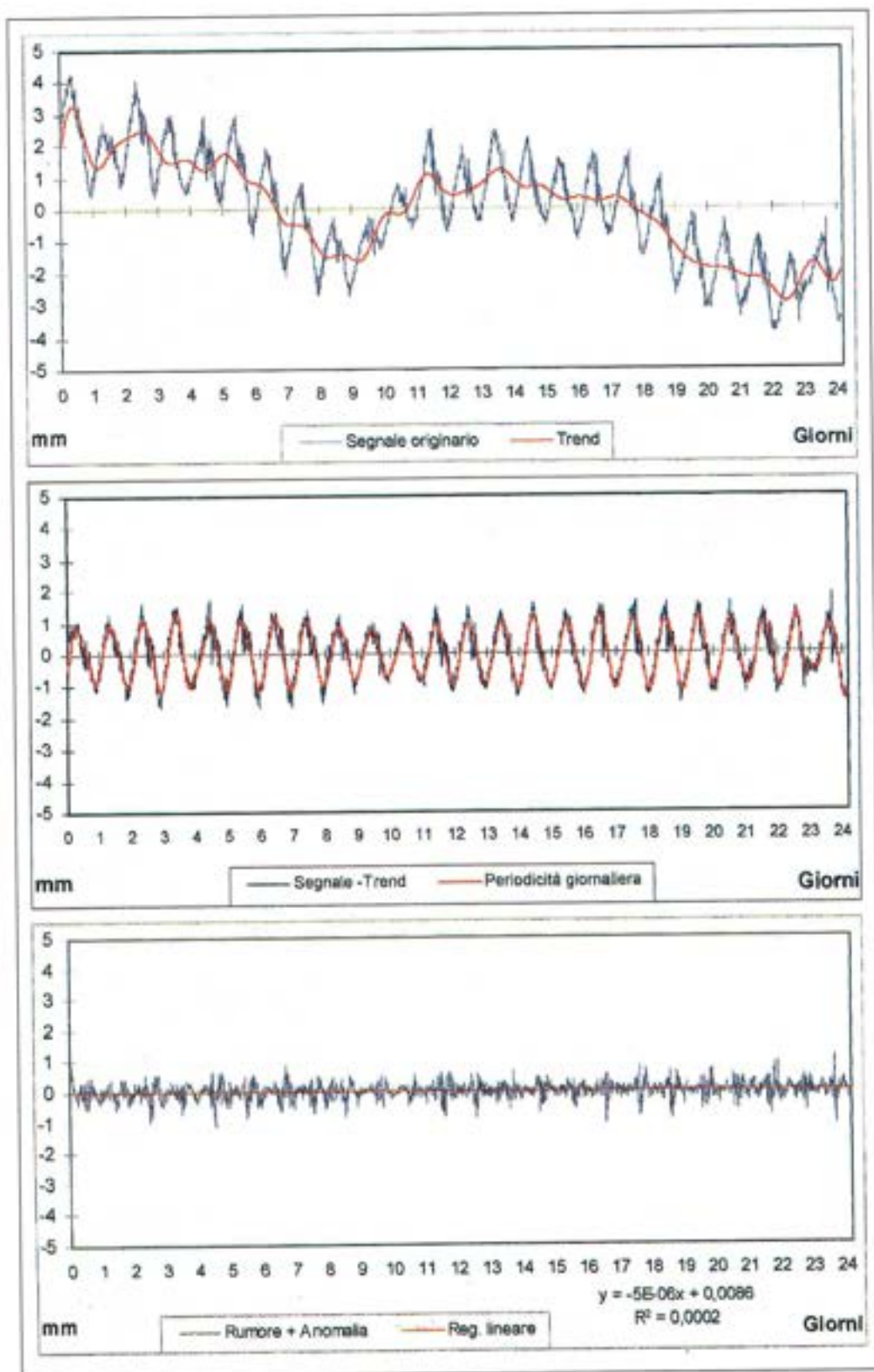


Fig. 18 - Il segnale della mira I durante le diverse fasi del filtraggio.

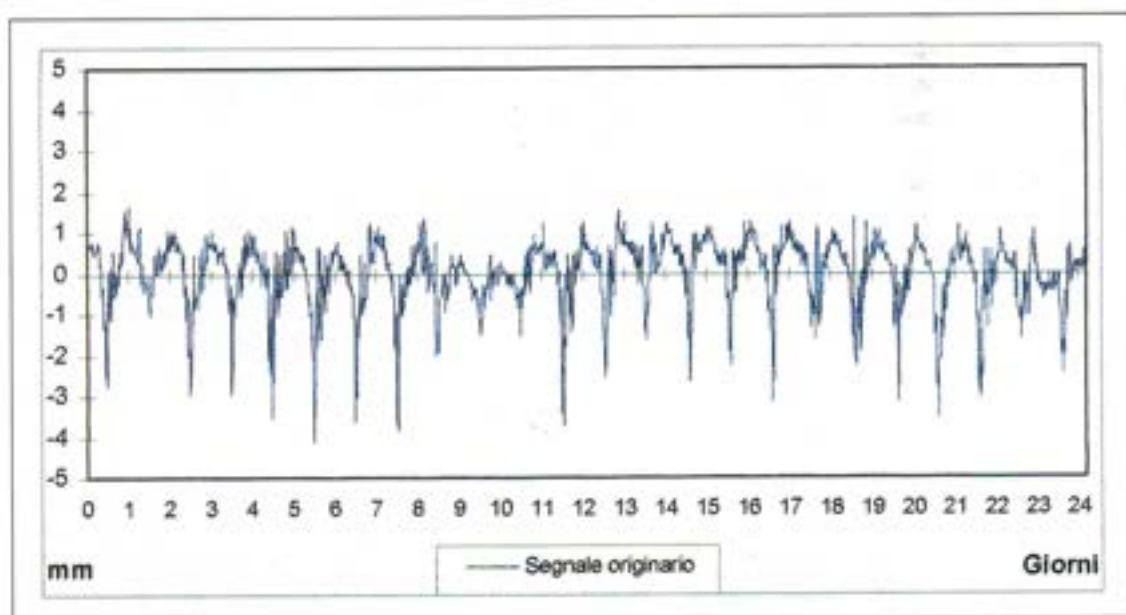


Fig. 19 - Segnale della mira fissa 0 durante il periodo considerato per l'analisi di Fourier.

6. - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il primo aspetto che si desidera mettere in evidenza è la rispondenza dei valori delle caratteristiche metrologiche di ISAC 5000 valutati nel corso delle campagne di misura rispetto a quelli dichiarati da ISMES. Il numero consistente di prove sperimentali svolte ha permesso di verificare come il collimatore mantiene queste caratteristiche nelle diverse condizioni meteorologiche.

Il secondo aspetto che merita di essere sottolineato riguarda l'affidabilità dello strumento. In questo senso sono risultate particolarmente significative le analisi svolte sui dati provenienti dalle installazioni sperimentali di Ambiesta e Comelico, dove erano installati anche altri sistemi di collimazione sia di tipo tradizionale (collimatori ottici) che automatici.

Nel corso delle 5 campagne di misura a Gusana si è potuto appurare che la procedura di validazione interna delle misure adottata da ISAC 5000 è fondamentale per l'affidabilità dello strumento, in quanto permette di scartare quei dati che sono fortemente sospettati di contenere errori.

Il problema dell'influenza dei parametri ambientali sul comportamento strumentale è stato oggetto di particolare attenzione nel corso di questo studio. In particolare si è osservato che, come per tutti gli strumenti ottici, l'influenza della rifrazione atmosferica sulle misure non può essere trascurata. Si è tuttavia osservato che questo problema si può ridurre ad effetti di entità trascurabile mediante l'impiego delle osservazioni di tipo relativo, che inoltre permettono di compensare le eventuali rotazioni del basamento dei collimatori.

L'utilizzo di modelli matematici della rifrazione atmosferica per correggere le misure non è risultato praticabile, in quanto bisognerebbe studiare e tarare un modello per ogni singola installazione. In modo analogo, l'impiego di dispositivi o procedure atte a valutare in tempo reale l'effetto della rifrazione atmosferica complicherebbe notevolmente il sistema, che proprio nella semplicità del funzionamento ha uno dei suoi punti di forza. Infatti ISMES, nel corso della sperimentazione per lo sviluppo e la messa a punto del collimatore, ha considerato diverse soluzioni utili a ridurre ulteriormente l'influenza dei parametri ambientali. Queste procedure non hanno però fornito benefici tali da giustificare l'incremento dei costi e inoltre costringerebbero ad aumentare la complessità del sistema con conseguente diminuzione della sua affidabilità.

Si deve considerare, comunque, che le prestazioni del collimatore automatico ISAC 5000 risultano in termini metrologici adeguate al controllo strutturale di grandi opere quali sono le dighe. Inol-tre la disponibilità di misure continue ed affidabili e la migliore accuratezza rispetto alla collimazione ottica manuale possono aumentare considerevolmente le condizioni di sicurezza delle opere strumentate.

Nell'installazione del sistema di collimazione devono essere ovviamente rispettati i principali requisiti comuni a tutti gli impianti di collimazione ottica ed in particolare devono essere studiati con particolare attenzione i percorsi di collimazione, che non possono essere troppo diversi fra loro in modo da sfruttare al meglio l'effetto di correzione delle misure operato mediante l'impiego delle osservazioni di tipo relativo, assunto che la costante di taratura dello strumento venga determinata in sito con elevata accuratezza.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Prof. A. Giussani per il coordinamento e la guida di questa ricerca. Si ringrazia il personale di ISMES Spa coinvolto in questo lavoro per l'apporto tecnico e la generosa disponibilità; in particolare l'Ing. A. Zattoni, il p.i. A. Perletti e il Dott. V. Galbiati. Si ringrazia il Servizio Controllo Dighe del Compartimento ENEL di Cagliari per l'assistenza offerta a Gusana e in particolare il Geom. G.F. Murgia che ha seguito personalmente tutte le campagne di misura. Infine si ringraziano i tesisti A. Tanzi e A. Figini per il lavoro svolto durante la loro tesi di laurea, riguardante la validazione del collimatore ISAC 5000.

BIBLIOGRAFIA

- ANESA F., AZZONI A., VERGANI M., MAZZÀ G., *Automatic system for monitoring dam displacements*. The Int. Journal of Hidropower & Dams (Marzo), 1995.
- BRACEWELL R.N., *The Fourier Transform and its applications*. McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1986.
- CUNIETTI M., GIUSSANI A., *Il collimatore automatico DELTA 2000 per la misura di spostamenti di grandi strutture*. Politecnico di Milano, Istituto di Topografia, Fotogrammetria e Geofisica, 1980. (Ristampa in: *Mariano Cunietti: una selezione della sua attività scientifica*, a cura di A. Giussani, Milano, 1998, pp. 219-249).
- DE MARCHI A., LO PRESTI C., *Incertezza di misura*. CLUT, Torino, 1993.
- ENEL, *Diga dell'Ambiesta*. ENEL S.p.a., Compartimento di Venezia.
- FEA G., *L'indice di rifrazione negli strati superficiali di una valletta aperta sul mare*. In Proceedings of the 15th Conference of Centro Nazionale di Fisica dell'Atmosfera e Meteorologia, Roma, 1966, pp. 31-35.
- FIGINI A., TANZI A., *Studio e certificazione del collimatore automatico per il monitoraggio strutturale ISAC 5000*. Tesi di Laurea presso il Politecnico di Milano, 1997.
- GIUSSANI A., *Control of big Structures by Integrated Instruments and Methods*. In Proceedings of XVI FIG Mondial Congress, Comm. 6, Montreux (Svizzera), 1981, pp. 602-1/10.
- HARRIS M. W., *GPS and the Karangi Dam*. In Proceedings of XXI FIG Mondial Congress, Comm. 6, Brighton (Gran Bretagna), 1998, pp. 345-351.
- ISMES, *Manuale tecnico della strumentazione automatica ISAC 5000*. ISMES Spa, Bergamo, 1995.

- ISO, IEC, OIML, BIPM, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*. 1992.
- MARAZIO A., *L'impiego dei collimatori nella misura degli spostamenti delle grandi dighe*. L'energia Elettrica, V fascicolo, 1962.
- MATINELLI C., PUCCI DELLE STELLE S., *Sviluppo e caratterizzazione di un piombo ottico automatico per il controllo delle deformazioni di grandi strutture*. Tesi di Laurea presso l'Università degli Studi di Brescia, 1996.
- SADE, *Diga del Comelico*. SADE Spa.
- SANSÒ F., *Il trattamento statistico dei dati*. CLUP Editore, Milano, 1993.
- WHITAKER C., DUFFY M.A., CHRZANOWSKI A., *Design of a Continuous Monitoring Scheme for the Eastside Reservoir in California*. In Proceedings of XXI FIG Mondial Congress, Comm. 6, Brighton (Gran Bretagna), 1998, pp. 329-344.